

Inovace SW pro monitorování přímého odporového ohřevu

Innovation of SW for monitoring of direct resistance heating

Bc. Patrik Chlachula

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá inovací monitorovacího softwaru pro přímý odporový ohřev. Teoretická část popisuje vznik a přestup tepla, problematiku přímého odporového ohřevu a je zde popsán laboratorní model, na kterém se provádí měření. V praktické části je popsán původní software a následně vývoj a funkčnost inovovaného softwaru pro přímý odporový ohřev. Na závěr jsou zde prezentovány výstupní naměřená data v grafické podobě z inovovaného softwaru.

Klíčová slova

C#, inovace, laboratorní model, měřicí karty, přímý odporový ohřev, software, Visual Basic

Abstract

This diploma thesis is focused on the innovation of monitoring software for direct resistance heating. The theoretical part describes formation and transfer of the heat also the issue of direct resistance heating and the laboratory model on which the measurement is made. The practical part presents the description of the original software and then development and functionality of innovated software for direct resistance heating is described here. Finally, the output measured data from the innovated software are presented here in graphical form.

Key words

C#, direct resistance heating, Innovation, laboratory model, measuring cards, software, Visual Basic

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Vladimíru Královi, Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování práce, cenné rady, připomínky a trpělivost při vedení práce. Velké poděkování patří také mé rodině a kamarádům za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Základy sdílení tepla	7
2.1 Přenos energie a přenos tepla	7
2.2 Přenos tepla vedením – difúze	8
2.2.1 Vedení tepla válcovou stěnou	9
2.3 Přenos tepla prouděním, difúzně-konvekční.....	10
2.4 Přenos tepla sáláním.....	11
2.4.1 Kirchhoffův zákon	12
2.4.2 Stefan–Boltzmannův zákon	13
2.4.3 Zákon Wienův	13
2.4.4 Zákon Planckův.....	14
3. Elektrický odporový ohřev	15
3.1 Přímý odporový ohřev.....	15
3.2 Napájení přímého odporového ohřevu.....	17
3.3 Elektrody pro přímý odporový ohřev.....	17
3.4 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů.....	18
3.5 Ohřev vsázky válcového tvaru	20
3.6 Ohřívání válcového modelu ve tvaru vsázky	21
4. Laboratorní model pro přímý odporový ohřev.....	23
4.1 Popis laboratorního modelu	23
5. Přímý odporový ohřev – starý program	29
5.1 Popis starého programu.....	29
5.2 Visual Basic 6.0	30
5.3 Popis měření starého programu.....	32
6. Přímý odporový ohřev – inovovaný program	35
6.1. Volba programovacího jazyka	35
6.2. Volba vhodného vývojového prostředí	35
6.3. Vývoj a popis inovovaného programu	37
7. Parametry pro monitorování přímého odporového ohřevu	42
8. Závěr	47
Seznam použitých zdrojů	48

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Název	Jednotka
A_{ξ}	úhrnná pohltivost černého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
A_{ξ}	úhrnná pohltivost šedého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
Bi	Bitotovo kritérium	[-]
C1	Planckova konstanta	$[W \cdot m^{-2}]$
C2	Planckova konstanta	$[m \cdot K]$
E	úhrnná zářivost	$[W \cdot m^{-2}]$
E	spotřeba	[Wh]
I	proud	[A]
Q	teplo	[J]
P_z	ztrátový výkon	[W]
R	odpor	$[\Omega]$
R_{20}	odpor materiálu při teplotě 20 °C	$[\Omega]$
M_{ξ}	úhrnná zářivost černého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
M_{ξ}	úhrnná zářivost šedého povrchu	$[W \cdot m^{-2}]$
Q_u	užitečné teplo	[J]
Q_z	ztrátové teplo	[J]
S	plocha	$[m^2]$
T	termodynamická teplota	[K]
V	objem prostředí	$[m^3]$
W	množství energie	[J]
c	měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
f	kmitočet	[Hz]
l	délka	[m]
r_1, r_2	poloměr	[cm]
i_j	okamžitá hodnota proudu	[A]
t	čas	[s]
u_j	okamžitá hodnota napětí	[V]
α	součinitel přestupu tepla prouděním	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
α	alfa	$[W/m^2 \cdot K]$
α	měrná spotřeba	[Wh/kg]
ϑ_1, ϑ_2	povrchové teploty	[°C]
ϑ_p	teplota povrchu tyče	[°C]
ϑ_o	teplota okolí	[°C]
σ	Stefan – Boltzmannova konstanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$
$\Delta\vartheta$	rozdíl teplot mezi dvěma vzorky	[°C]
λ	vlnová délka	[m]
ρ	rezistivita materiálu	$[\Omega \cdot mm^2 \cdot m]$
ω	úhlový kmitočet	$[rad \cdot s^{-1}]$

1. Úvod

V současnosti si život bez elektrické energie většina z nás nedovede ani představit. Jednou z mnoha možností využití elektrické energie je její použití na elektrický ohřev. Toto uplatnění najdeme od domácího přímotopu, pomocí kterého ohříváme vzduch v místnosti, až po průmyslové pece, ve kterých se taví kov.

Existují různé způsoby elektrických ohřevů. Jedním z nich je elektrický indukční ohřev, který pro ohřev vsázky využívá elektromagnetické pole, vzniklými vířivými proudy se vsázka zahřívá. Patří sem i elektrický obloukový ohřev, kde se mění elektrická energie na teplo v silném elektrickém výboji, v oblouku hořícím v ionizovaném prostředí plynů a par. Ale tím nejjednodušším způsobem ohřevu je elektrický odporový ohřev.

Elektrický odporový ohřev využívá vodivého materiálu, kterým prochází elektrický proud, a to způsobí vznik tepla. Tento způsob ohřevu se dělí na elektrický odporový ohřev nepřímý a na elektrický odporový ohřev přímý. U nepřímého odporového ohřevu se nejprve zahřeje topný článek, který následně za pomoci sálání nebo proudění předává energii vsázce. U přímého elektrického ohřevu teplo vzniká přímo ve vsázce. Tento způsob ohřevu je jednoduchý, účinný, na ovládání neklade velké nároky a má malou poruchovost.

Úkolem této diplomové práce bylo inovovat software pro přímý odporový ohřev. Práce se skládá ze dvou částí: teoretické části (kapitoly dva až čtyři) a praktické části (kapitoly pět až sedm). V teoretické části jsou rozebrány základní principy šíření tepla, přiblížena problematika přímého odporového ohřevu a popsán laboratorní model, na němž je prováděno laboratorní měření. V praktické části je nejprve popsán rozbor programu Přímý odporový ohřev z roku 2004. Je zde také zmíněno vývojové prostředí, ve kterém byl zdrojový kód k tomuto programu napsán a následně je zde popsán průběh měření se starým programem. Druhá polovina praktické části se zabývá mnou vytvořeným programem Přímý odporový ohřev. Je zde uvedena volba programovacího jazyka a vývojového prostředí, ve kterém je inovovaný program vyvinut. Dále jsou zde uvedeny zvolené parametry, pomocí kterých můžeme sledovat probíhající měření. Do těchto parametrů byly následně dosazeny naměřené hodnoty a provedeny kontrolní výpočty. Jelikož jsem program testoval na laboratorním modelu a naměřené výsledky se vztahují k laboratorní úloze předmětu Energetické problémy elektrotepelných zařízení, byly z těchto hodnot na závěr vytvořeny grafy vypovídající o průběhu měření, které byly vytvořeny pomocí tabulkového software Excel.

2. Základy sdílení tepla

2.1 Přenos energie a přenos tepla

Přenos energie (tepla) prostředím je uskutečňován prostřednictvím nosičů energie. Tyto nosiče jsou částice, které se nacházejí v daném prostředí, ale mají vyšší energii než částice v jejich blízkosti, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z tohoto důvodu záleží na typu prostředí, druhu, rychlosti a způsobu pohybu částic. Jedná se zejména o elementární částice (atomy a elektrony), ale i elektromagnetické vlny, které přenášejí energii pomocí fotonů.

Byly objeveny pouze dva způsoby přemísťování částic (nosičů energie), které rozdělujeme podle koncentrace látkových částic v daném prostředí. [1]

První způsob, který se používá především v prostředích s vysokou koncentrací částic (pevné nebo kapalně skupenství) se nazývá difúze. Jedná se o vrozený přenos teploty z teplejších míst do míst studenějších. Energie se předává pomocí neustálých srážek mezi částicemi.

Další možnost přenosu je difúzně-konvekční způsob, který nastává v proudících kapalinách a je vysoce závislý na rychlosti proudění tekutiny.

Druhý, rozdílný způsob, nastává v prostředí s nízkou koncentrací částic. Tyto nosiče energie se přemísťují pomocí záření. Jedná se tedy například o formu světla. [1]

Pro tyto způsoby přenosu tepla z teplejších míst do studenějších míst byly odvozeny následující tři varianty přenosu:

- vedením (kondukce) – u těles v pevném skupenství,
- prouděním (konvence) – v prostředích plynných a kapalných,
- sáláním, případně zářením (radiací). [1]

V praxi se téměř vůbec nesetkáváme s případem výskytu jen jednoho způsobu přenosu tepla. Většinou jde o kombinaci dvou nebo tří typů přenosů naráz. V následujících podkapitolách budou nastíněny tyto typy podle jednotlivých skupin. Jejich následnou celkovou přenesenou energii získáme součtem energie přenesených v jednotlivých skupinách. [4]

Teplo se při průmyslových aplikacích nebo při vytápění šíří obecně známým principem šíření energie, tedy z místa s větší hustotou energie k místu s hustotou energie menší. Následující rovnice (1.1) vyjadřuje výpočet objemové hustoty energie:

$$w = \frac{dW}{dV} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.1)$$

kde:

W – množství energie [J],

V – objem prostřední [m³].

Intenzitu přenosu energie vyjadřuje tepelný tok (výkon).

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (1.2)$$

kde:

Q – teplo [J],

t – čas [s].

Hustotu tepelného toku rozumíme jako průchod daného tepelného výkonu plochou.

$$q = \frac{dP}{dS} = \frac{d^2Q}{dS \cdot dt} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.3)$$

kde:

S – plocha [m^2].

[1]

2.2 Přenos tepla vedením – difúze

Tepelný tok, který prochází stejnorodou rovinnou stěnou o tloušťce l , ploše S a rozdílu dvou povrchových teplot ϑ_1, ϑ_2 se vypočítá podle následující rovnice:

$$\Phi = \frac{\lambda}{l} \cdot S \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad [\text{W}] \quad (1.4)$$

kde:

Φ – tepelný tok [W],

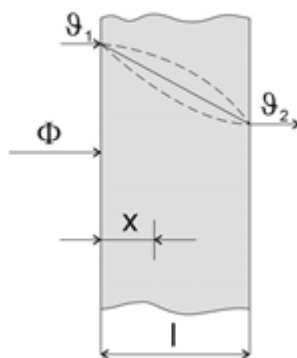
l – tloušťka [m],

S – plocha [m^2],

ϑ_1, ϑ_2 – rozdíl povrchových teplot [$^{\circ}\text{C}$].

Teplota se zmenšuje lineárně se vzdáleností x , z hodnoty teploty, která je vyznačena na levé straně stěny, na teplotu, která je vyznačena na pravé straně stěny obrázku (1.1) a je popsána rovnicí (1.5). Čárkovanou čarou na obrázku (1.1) je rozdělen průběh vedení tepla pro keramické materiály a pro čisté kovy. Průběh vedení tepla pro keramické materiály je znázorněn nad lineárním průběhem a pro čisté kovy pod lineárním průběhem. [1]

$$\vartheta = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{l} \cdot x + \vartheta_1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.5)$$



Obr. 1.1: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou [1]

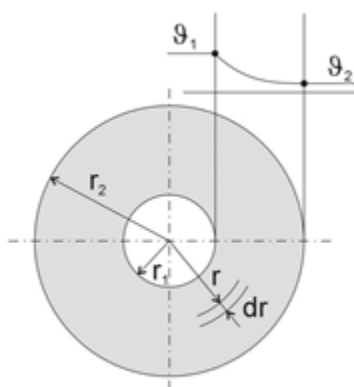
Šíření tepla tímto způsobem je velice komplikovaný proces. Matematicky nelze v běžné situaci tento problém zvládnout, a proto se při výpočtech elektrických pecí uplatňují zjednodušující předpoklady. Jedním ze zjednodušujících předpokladů je případ, kdy se vedení tepla počítá ve stejnorodém prostředí. Šíření tepla vedením nastává v pevném, kapalném a plynném prostředí, a to za předpokladu, že není v bádaném objektu všude stejná teplota. [4]

2.2.1 Vedení tepla válcovou stěnou

Teplo, které proudí z vnitřního povrchu tlustostěnné válcové trubky k vnějšímu povrchu, se při vzrůstajícím průměru zvětšuje. Zvětšuje se také plocha, kterou teplo prochází. Z tohoto důvodu mají křivky průběhu teplot, které jsou závislé na poloměru válce, logaritmický tvar.

Pro tepelný tok platí následující vztah: [1]

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot l \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad [\text{W}] \quad (1.6)$$



Obr. 1.2.: Vedení tepla válcovou stěnou [1]

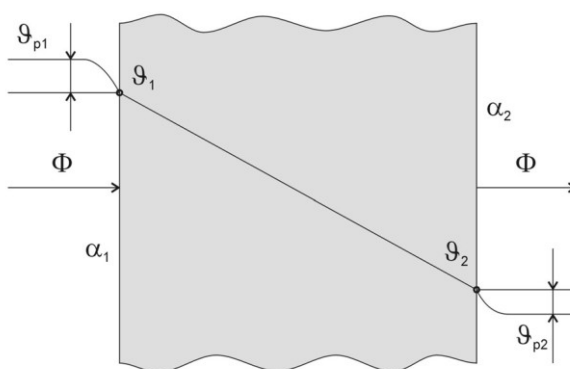
2.3 Přenos tepla prouděním, difúzně-konvekční

Rovněž přenos tepla prouděním je velice problémový pro matematické výpočty v tepelné technice, jelikož pro výpočty musíme znát hodnotu součinitele přestupu tepla α . Hodnota součinitele přestupu tepla je závislá na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění, na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustoty, viskozitě, měrné tepelné kapacitě, tepelné vodivosti), dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. V praxi se tento problém řeší způsobem, že se vytvoří model co nejvíce podobající se případu, který řešíme a následně se tento model vyhodnocuje měřením. [1]

Pro přestup tepla prouděním platí Newtonův zákon:

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_1) \cdot S \quad [\text{W}] \quad (1.7)$$

$$\dot{Q}_2 = \alpha_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_{p2}) \cdot S \quad [\text{W}] \quad (1.8)$$



Obr. 1.3.: Přenos tepla prouděním [1]

Obrázek 1.3 znázorňuje svislou stěnu. Na levé straně stěny vidíme teplotu okolí ϑ_{p1} a na pravé straně stěny vidíme teplotu okolí ϑ_{p2} , která je nižší než teplota na levé straně stěny ϑ_{p1} . Při ustáleném tepelném stavu, kdy stěnou prochází stálý tepelný tok směrem k vnějšímu povrchu, nastane situace, kdy na levé straně bude teplota povrchu stěny $\vartheta_1 < \vartheta_{p1}$ než teplota okolí a na pravé straně stěny bude teplota povrchu stěny $\vartheta_2 > \vartheta_{p2}$ než teplota okolí. Tento jev nastává při zahřívání plynného nebo kapalného prostředí okolí stěny, protože částice teplejší (lehčí) stoupají a chladnější (těžší) částice klesají. Na rozhraní stěna – prostředí dojde k takzvanému přirozenému proudění. [4]

Ve všech případech zůstává mezi stěnou a prostředím malá vrstva plynu, která se nezúčastňuje proudění. Tato vrstva plynu způsobuje teplotní skok, jelikož u plynu dochází k tepelnému toku pouze vedením a má velmi malou tepelnou vodivost. Proti těmto tepelným skokům se používají například ventilátory, jelikož se za pomoci nucené cirkulace vzduchu snažíme danou vrstvu plynu, která lpí na stěně, co nejvíce eliminovat. [4]

2.4 Přenos tepla sáláním

Těleso, jehož teplota je větší než absolutní nula, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Jedná se o elektromagnetické vlnění, které se v průzračném prostředí šíří přímočaře a všemi směry. Elektromagnetické vlny, které se šíří z jednoho průzračného prostředí do druhého průzračného prostředí se šíří podle zákonů geometrické optiky. Jestliže dopadají tyto vlny na jakékoliv těleso a povrch tělesa absorbuje více energie, než jej odrazí, tak se dané těleso začne zahřívat. V opačném případě, kdy těleso odrazí více energie, než absorbuje, se dané těleso začne ochlazovat. Každé těleso částečně pohlcuje záření, které jím prochází. Při dopadu tepelného záření na částečně průzračné těleso se část energie pohltí, část se odrazí a část projde tělesem. Dopadající záření (tok energie) dělíme na následující tři části: [2]

$$\text{Poměrná pohltivost} \quad A = \frac{\text{energie pohlcená}}{\text{energie celková, dopadlá'}}$$

$$\text{Poměrná odrazivost} \quad B = \frac{\text{energie odražená}}{\text{energie celková, dopadlá'}}$$

$$\text{Poměrná propustnost} \quad C = \frac{\text{energie prošlá}}{\text{energie celková, dopadlá'}}$$

Je zřejmé, že platí:

$$A + B + C = 1 \quad (1.9)$$

Absolutně černý povrch – veškerá energie tepelného toku je tělesem pohlcena

$$A = 1; \quad B = 0; \quad C = 0.$$

Absolutně bílý povrch – všechnu příchozí energii těleso odráží

$$B = 1; \quad A = 0; \quad C = 0.$$

Absolutně průzračný povrch – všechnu energii propustí (dvouatomové plyny a vzduch)

$$C = 1; \quad A = 0; \quad B = 0.$$

Jelikož jsou jednotlivé složky (A, B, C) závislé na frekvenci elektromagnetických vln, musíme brát v potaz jejich spektrální hodnoty, a pro všechny vlnové délky musí platit: [2]

$$A_{\lambda} + B_{\lambda} + C_{\lambda} = 1 \quad (1.10)$$

Tělesa, která by měla absolutně černý, bílý nebo průzračný povrch ve skutečnosti neexistují. Reálným tělesům, které nemají tyto extrémy říkáme z fyzikálního hlediska tělesa šedá.

Podle Kirchhoffova zákona by absolutně černé těleso mělo být schopno všechnu dopadající energii pohltit a následně ji co nejvíce vyzařit. Proto se absolutně černé těleso využívá ke srovnávání s jinými tělesy, a i z tohoto důvodu jsou právě základní zákony záření odvozeny pro absolutně černé těleso. [2]

2.4.1 Kirchhoffův zákon

Poměr úhrnné zářivosti a relativní pohltivosti šedého tělesa je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa T a nezávisí na barvě jeho povrchu. Tělesa s absolutně černým povrchem mají vždycky poměr pohltivosti $A_{\epsilon} = 1$ a tělesa s šedým povrchem mají vždycky $A_{\epsilon} < 1$. Pro úhrnnou zářivost můžeme tedy napsat Kirchhoffův zákon, který zní:

$$\frac{M_{\epsilon}}{A_{\epsilon}} = f(T) = \frac{M_{\epsilon}}{A_{\epsilon}} = M_{\epsilon} \quad (1.11)$$

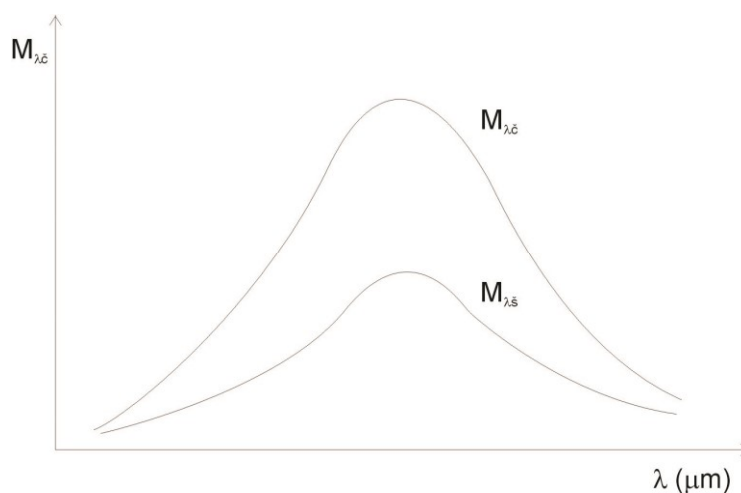
kde:

- M_{ϵ} – úhrnná zářivost šedého povrchu,
- M_{ϵ} – úhrnná zářivost černého povrchu,
- A_{ϵ} – úhrnná pohltivost šedého povrchu,
- A_{ϵ} – úhrnná pohltivost černého povrchu.

Kirchhoffův zákon platí také pro spektrální zářivost a spektrální pohltivost, a proto můžeme napsat následující rovnici: [1]

$$\frac{M_{\lambda\epsilon}}{A_{\lambda\epsilon}} = f(T, \lambda) = M_{\lambda\epsilon} \quad (1.12)$$

Na obrázku 1.4 vidíme spektrum zářivosti absolutně černého povrchu a spektrum zářivosti fyzikálně šedého tělesa. Pro obě varianty platí, že jejich křivky nejsou v žádném místě po celé vlnové délce přerušeny a jsou si svým průběhem podobné. [1]



Obr. 1.4: Spektrální zářivost pro černý a šedý povrch [1]

2.4.2 Stefan–Boltzmannův zákon

Zákon popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování M roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa. [1]

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.13)$$

kde:

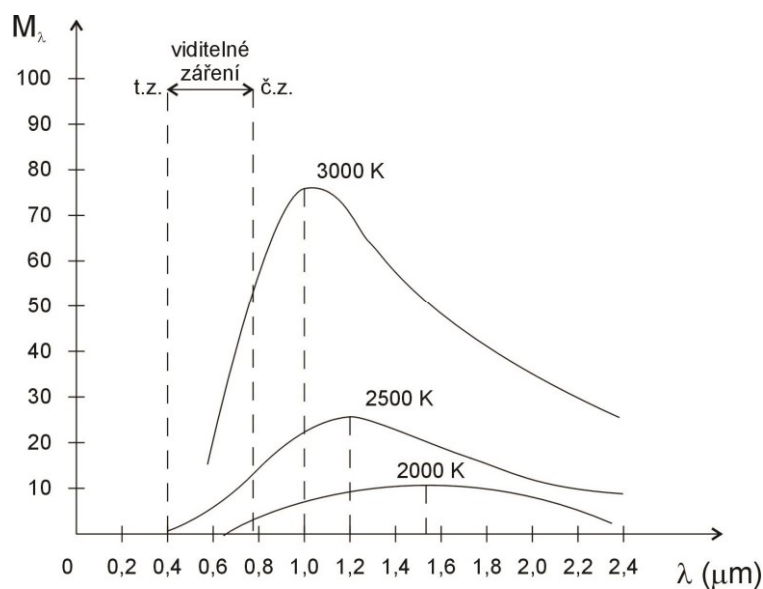
σ – je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K]$,

T – termodynamická teplota ($T = (t + 273)^\circ C$) [K].

2.4.3 Zákon Wienův

Spektrální intenzita záření M_λ je za dané teploty nejintenzivnější pro vlnovou délku λ_m , která je nepřímo úměrná této teplotě T . Z toho můžeme usoudit, že tělesa, která mají nízkou povrchovou teplotu vyzařují pouze dlouhovlnné (infračervené) záření. Když tělesu dodáme energii (zahřejeme ho), zvýšíme jeho zářivost a i maximální vyzařené spektrum se posune ke kratším vlnovým délkám – Wienův posunovací zákon. [1]

$$\lambda_m = \frac{2892}{T} \quad (1.14)$$



Obr. 1.5: Wienův posunovací zákon [1]

2.4.4 Zákon Planckův

Tento zákon popisuje závislost spektrální intenzity záření M_λ absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě

$$M_\lambda = f(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.15)$$

kde:

Planckovy konstanty: $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$,
 $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}]$.

Pomocí rovnice 1.15 vyjadřujeme pouze výkon z 1m^2 plochy pro jednu vlnovou délku. Pro vyjádření celkového vyzářeného výkonu musíme započíst všechny vlnové délky $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$. [1]

$$M(T) = \int_0^\infty M(T, \lambda) \cdot d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \cdot d\lambda \quad (1.16)$$

3. Elektrický odporový ohřev

V elektrických zařízeních pro elektrotepelný odporový ohřev se mění elektrická energie v tepelnou podle Joulova zákona: Prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká ve vodiči teplo. Teplo, které ve vodiči vzniká je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče. [2]

$$Q = RI^2 \cdot t = P \cdot t \quad [\text{J}] \quad (2.1)$$

Odpor vodiče vyjadřujeme vzorcem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (2.2)$$

kde:

- ρ – rezistivita materiálu,
- l – délka odporového vodiče [m],
- S – průřez materiálu [mm^2].

Rezistivita materiálu ρ je veličina, která je u většiny materiálů závislá na teplotě. Při oteplení materiálu o Δt je popsána následující rovnicí:

$$R_{\theta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad [\Omega] \quad (2.3)$$

Teplotní činitel odporu α je pro většinu kovů kladný, silně závislý na teplotě a pro keramické materiály je záporný. [1]

Elektrický odporový ohřev se dělí na dva základní typy:

- přímý odporový ohřev – teplo vzniká přímo ve vsázce,
- nepřímý odporový ohřev – teplo vzniká mimo vsázku a je do ní přenášeno zářením a prouděním.

3.1 Přímý odporový ohřev

V zařízeních určených pro přímý odporový ohřev vzniká teplo průchodem proudu elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou, která je galvanicky připojena ke zdroji střídavého nebo stejnosměrného proudu.

Teoretické základy přímého odporového ohřevu, které jsou popsány Joulovým zákonem jsou jednoduché, ale projektování a výpočty těchto zařízení jsou obtížné. Tyto obtíže jsou spojeny s nelineární závislostí fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě. Veličiny jako jsou rezistivita, měrná tepelná kapacita anebo součinitel tepelné vodivosti ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem: [2]

$$Q = Q_u + Q_z \quad [\text{J}] \quad (2.4)$$

kde:

- Q – teplo vzniklé průchodem proudu,
 Q_u – užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky,
 Q_z – tepelné ztráty,

Rovnice pro tepelnou bilanci je základem k určení potřebného výkonu

$$P \sim \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (2.5)$$

Ze vzorce je patrné, že výkon je závislý na časovém průběhu ohřevu vsázky. Celkový odebíraný výkon P_c se mimo jiné skládá ze ztrát způsobených vsázecím zařízením o výkonu potřebném pro pohony mechanismů a ze ztrát příslušného transformátoru.

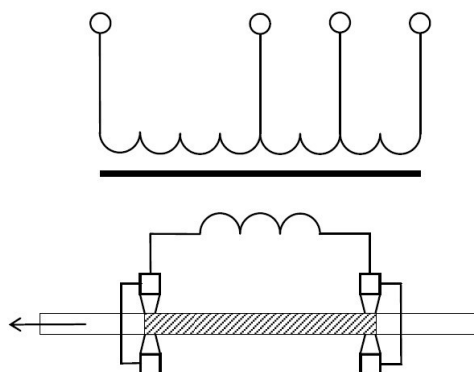
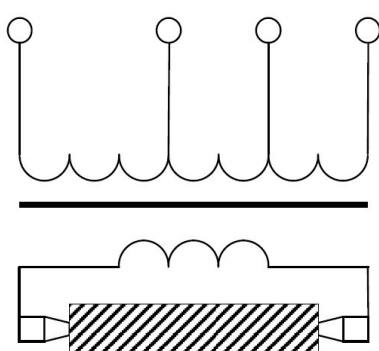
Zařízení pro přímý odporový ohřev lze rozdělit na dva základní typy podle vzniku tepla:

1. zařízení pro ohřev pevné vsázky kovové, uhlíkové nebo grafitové. U kovové vsázky se jedná o tvary tyčí, drátů, pásů apod.,
2. zařízení pro ohřev tekuté vsázky. Zde patří například ohřev v elektrodových kotlích, kde vsázka je voda nebo může jít o přehřev a tavení, kde vsázkou může být roztavené sklo.[2]

Dále můžeme přímý odporový ohřev rozdělit na dva typy, a to podle způsobu ohřevu:

1. nepohyblivá vsázka – vsázka je ohřívána v celé své délce,
 2. pohyblivá vsázka – vsázka se posouvá mezi elektrodami, části mezi elektrodami se ohřívají.
- [3]

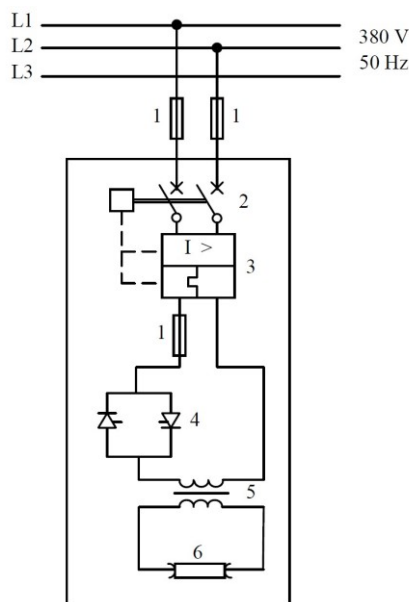
Na obrázcích 2.1 a 2.2 je naznačen odporový ohřev s nepohyblivou a pohyblivou odporovou vsázkou. Části obrázků, které jsou vyšrafovány znázorňují místo ohřevu.



Obrázek 2.1: Nepohyblivý odporový ohřev [4] Obrázek 2.2: Pohyblivý odporový ohřev [4]

3.2 Napájení přímého odporového ohřevu

Pro napájení se používají napáječe stejnosměrného nebo střídavého proudu. Obvykle se reguluje střídavé napětí pomocí tyristorového regulátoru napětí, kde změna napětí je plynulá a nebo se využívá skoková změna napětí pomocí přepínání odboček transformátoru.[3]

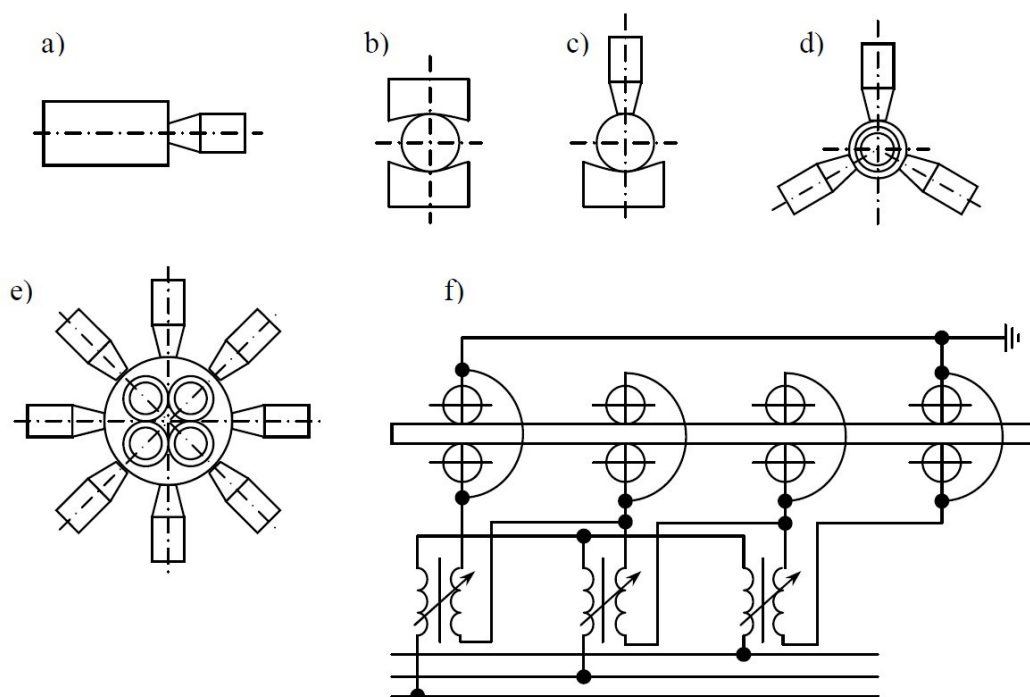


Obrázek 2.3: Napájecí obvod s plynulou regulací napětí

1 – jištění, 2 – vypínač, 3 – zabezpečovací relé, 4 – tyristory, 5 – proudový transformátor, 6 – vsázka [3]

3.3 Elektrody pro přímý odporový ohřev

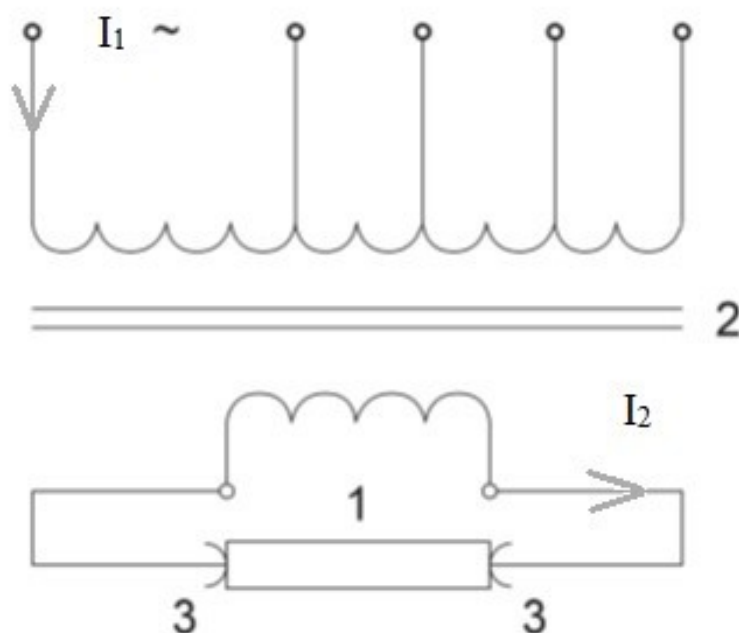
Pomocí stykových kontaktů (elektrod) dodáváme elektrickou energii přímo do vsázky. Elektrody mohou být nepohyblivé (pevné) a pohyblivé mezi které patří například kluzké, válečkové nebo kapalinové elektrody. Materiál, ze kterého se vyrábí nepohyblivé, kluzké a válečkové elektrody bývá zpravidla měď, grafit nebo legovaná ocel. Tvar, počet a způsob rozmístění elektrod záleží na intenzitě protékajícího proudu a na konstrukci zařízení. Při velké intenzitě proudu se obvykle chladí vodou a aby byl zajištěn ještě lepší přenos elektrické energie do vsázky, bývají tyto elektrody dotlačovány pneumaticky velkou silou na vsázku. Médium používané u kapalinových kontaktů je například tekuté olovo, cín nebo rozpuštěné soli a louhy. Na obrázku 2.4 můžeme vidět různé příklady stacionárních elektrod a také válečkové elektrody, které jsou pohyblivé a napájené třífázovým napájením. [3]



Obrázek 2.4: Stykové kontakty elektrod při přímém odporovém ohřevu [3]:
a) – e) – Nepohyblivé elektrody, f) – válečkové elektrody (válečkový ohřev) při třífázovém napájení

3.4 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů

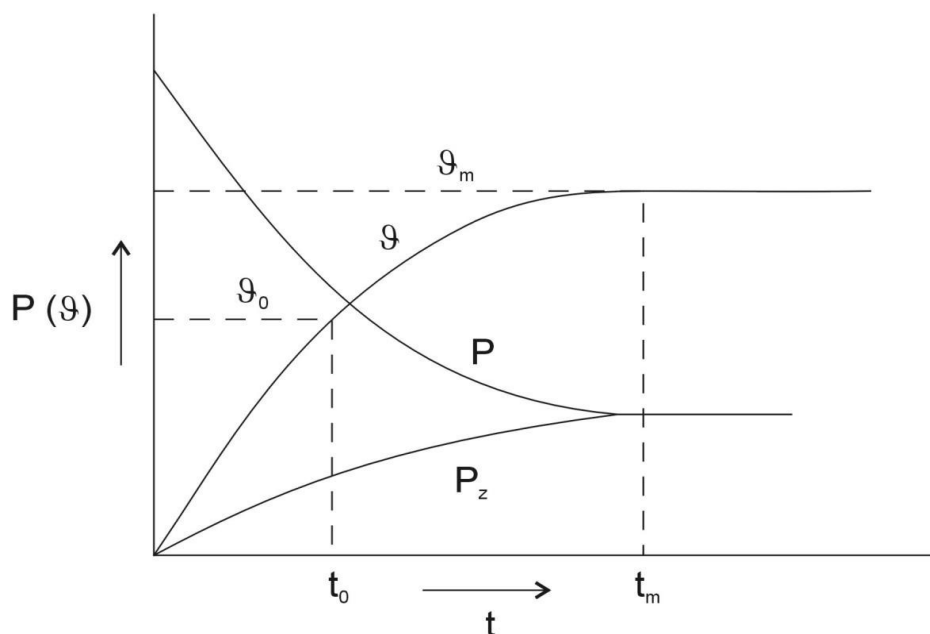
Na obrázku 2.5. je znázorněn princip přímého odporového ohřevu. Aby se dosáhlo rovnoměrného ohřevu tyče v celé své délce, která je umístěna mezi elektrodami, je nutné, aby délka ohřívané tyče byla nejméně 10krát větší než její průměr. Do tyče 1 je z regulačního transformátoru 2 zaváděn kontakty 3 velký proud. Tento způsob ohřevu je rychlý a účinný.[2]



Obrázek 2.5 Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů [2]

Optimální poměry odporového ohřevu nastávají tehdy, kdy činný odpor tyče se rovná impedanci celého přívodního vedení. K tomuto optimálnímu stavu se nejlépe přibližuje studená měděná tyč. Tyto optimální poměry lze v praxi jen stěží udržet, protože například odpor oceli při ohřevu z 20 °C na 1200 °C stoupne zhruba sedmkrát. Abychom udrželi impedanci v přijatelných mezích, je zapotřebí zvyšovat během ohřevu napětí na tyčích společně s růstem odporu na tyčích, a to za pomoci přepínání odboček transformátoru na jeho vstupním vinutí. Jedna z nevýhod tohoto ohřevu je v tom, že se musí zařízení při každé ohřívání tyči zapínat a vypínat. Tím rostou nároky na spínací zařízení a zvyšuje se velikost zkratového proudu, což u velkých výkonů bývá zpravidla problémové, jelikož může napětí v síti kolísat. [2]

Na obrázku 2.6 můžeme vidět průběhy příkonu, teploty a ztráty ocelové tyče při přímém odporovém ohřevu bez přepínání napětí. Příkon klesá podle růstu odporu tyče s teplotou, tepelné ztráty rostou. Pokud je příkon roven ztrátám dosáhla teplota své mezní hodnoty, proto musí být zpravidla teplota ohřevu vždy menší, než je mezní teplota. [2]



Obrázek 2.6: Průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče [2]

Při přímém odporovém ohřevu feromagnetických tyčí střídavým proudem se uplatňuje značně povrchový jev. Největší teplo (86,4 %) vzniká přibližně v takzvané hloubce vniku a , kterou lze určit pomocí následujícího vztahu:

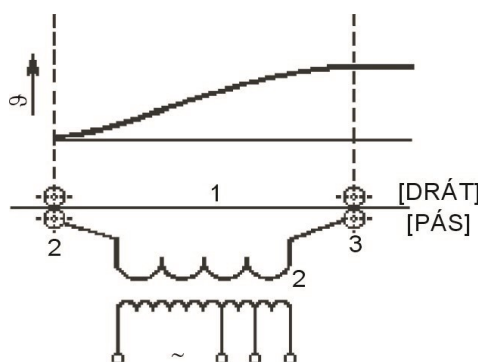
$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2.6)$$

kde:

- ρ - rezistivita tyče,
- ω - úhlová rychlost,
- μ_0 - permeabilita vakua,
- μ_r - relativní permeabilita.

Magnetická (konstrukční) ocel má při 50 Hz a do teploty 768 °C, kdy nastává ztráta feromagnetismu (Curieův bod) hloubku vniku pouze v jednotkách mm, ale nad 768 °C se rapidně zvýší rezistivita tyče (zhruba 7krát) a to má za následek, že hloubka vniku bude zhruba 70 mm. [2]

Zařízení určené pro průběžný ohřev je schematicky znázorněno na obrázku 2.7. Ohříváný materiál 1 je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 připojen kladkami 3 nebo grafitovými bloky. K dosažení konečné teploty, kterou potřebujeme k ohřevu dosáhneme pomocí změny vzájemné vzdálenosti mezi kladkami, změnou rychlosti, kterou je drát protahován zařízením nebo změnou napětí mezi kladkami. Jelikož je tento druh ohřevu velice rychlý, nedochází k velké oxidaci a oduhličení materiálu. Takový ohřev je vhodný pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm, pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání a kalení drátů. [2]

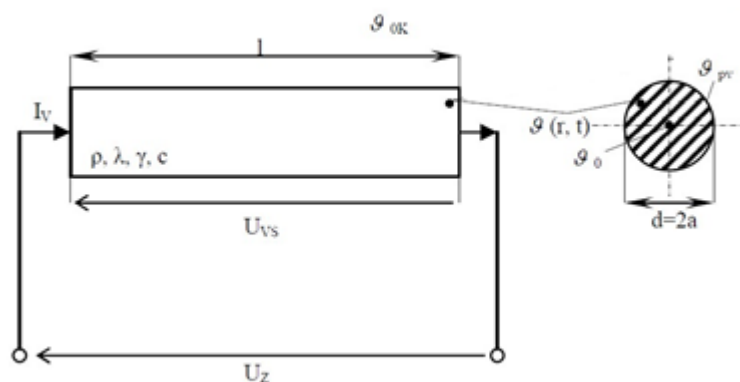


Obrázek 2.7: zařízení pro průběžný ohřev [2]

3.5 Ohřev vsázky válcového tvaru

Na modelu přímého odporového ohřevu zkoumáme vsázku válcového tvaru délky l připojenou ke zdroji napájení o napětí U_W . V napájecím obvodu tohoto modelu vzniká úbytek napětí, který má hodnotu ΔU_u . Při výpočtech pracujeme s následujícími zjednodušeními a předpoklady:

- materiál, který používáme ve vsázce je homogenní, izotropní a všechny jeho další parametry (ρ – rezistivita, λ – měrná tepelná vodivost, c – měrná tepelná kapacita, γ – měrná hmotnost) nejsou teplotně závislé,
- v počátku výpočtu (v čase $t=0$) mají všechny body vsázky stejnou teplotu, která je rovna teplotě okolí,
- průtok proudu vsázkou je rovnoměrný, což znamená, že se neuvažuje povrchový jev (hustota proudu je stejná v bodě vsázky),
- počítáme s tepelnými ztrátami do okolí pouze s boční stěnou povrchu vsázky (ztráty, které vznikají z čelních povrchů vsázky jsou rovny nule) a to při konstantním součiniteli přestupu tepla α . [3]



Obrázek 2.8: Model přímého odporového ohřevu pro válcový tvar vsázky [3]

3.6 Ohřívání válcového modelu ve tvaru vsázky

S přijatými předpoklady pro teplotní pole $\vartheta(r, t)$ je následně popsáno pomocí diferenciálních rovnic:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{1}{k} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} - \frac{p_v}{\lambda} \quad (2.7)$$

kde:

$$k = \frac{\lambda}{c\gamma} \quad (2.8)$$

k – součinitel teplotní vodivosti []

$$p_v = \frac{I_v^2 \rho}{\pi^2 a^4} \quad (2.9)$$

Funkce teploty $\vartheta(r, t)$ musí splnit hraniční podmínky pro $t > 0$:

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=a} = -h\vartheta(a, t) \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (2.11)$$

a také se musí splnit počáteční podmínka (za předpokladu, že $\vartheta_{ok} = 0$)

$$\vartheta(r, 0) = 0, r \in (0, a)$$

kde:

$$h = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (2.12)$$

Funkce $\vartheta(r, t)$ pro $r \in (0, a)$, $t > 0$ a také $\vartheta_{ok} > 0$ vypadá následovně:

$$\vartheta(r, t) = \frac{p_v}{4\lambda} \left(a^2 - r^2 + \frac{2a}{h} \right) - \frac{2p_v a^3 h}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{B_n r}{a}\right) \exp\left(-\frac{B_n^2}{a^2} k t\right)}{B_n^2 (B_n^2 + a^2 h^2) J_0(B_n)} + \vartheta_{ot} \quad (2.13)$$

kde B_n jsou prvky rovnice:

$$Bi J_0(\beta) - \beta J_1(\beta) = 0 \quad (2.14)$$

$$Bi = \frac{\alpha a}{\lambda} = \frac{\frac{s}{\lambda}}{\frac{1}{a}} = \frac{R_\lambda}{R_a} \quad (2.15)$$

J_0, J_1 - Besselova funkce prvního řádu nulté a první derivace,

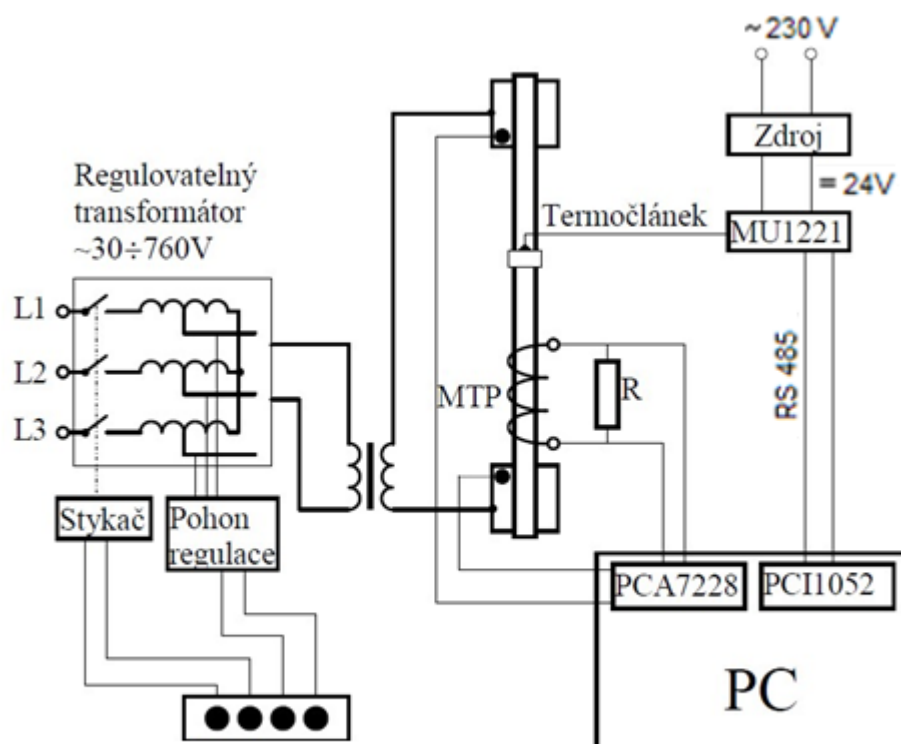
Bi - Biotovo kritérium. [3]

Biotovo kritérium vyjadřuje poměr tepelného toku přenášeného povrchem vsázky prouděním, k tepelnému toku přenášenému uvnitř vsázky vedením. Jinými slovy je to poměr tepelného odporu vlastní vsázky R_λ k tepelnému odporu rozhraní povrchu vsázky – okolí R_a .

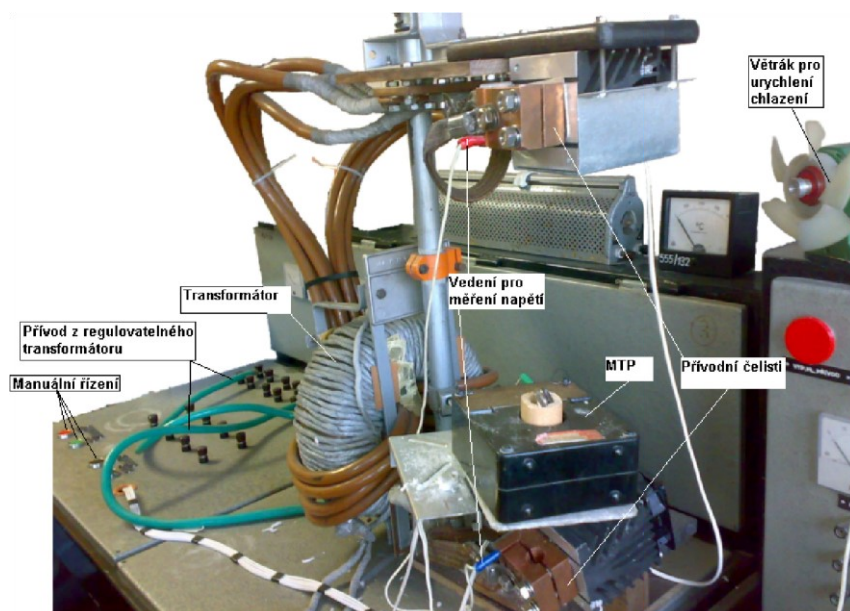
V případě $Bi > 100$ je tepelný odpor při přestupu tepla na povrchu nepatrný oproti tepelnému odporu vedením, což má za následek nerovnoměrné teplotní pole. V případě $Bi < 0,1$ je teplotní spád na povrchu tělesa veliký, ale uvnitř tělesa nepatrný, což vyjadřuje rovnoměrné teplotní pole.[1]

4. Laboratorní model pro přímý odporový ohřev

4.1 Popis laboratorního modelu



Obrázek 3.1: Schéma zapojení laboratorní úlohy pro přímý odporový ohřev [4]



Obr. 3.2: Laboratorní model přímého odporového ohřevu [4]

Laboratorní model, jenž se využívá pro měření přímého odporového ohřevu, se dá rozdělit na napájecí, regulační a měřicí část.

Napájecí část

Napájení je uskutečněno za pomoci přívodního vedení připojeného k třífázovému regulovatelnému transformátoru. Součástí přívodního vedení je třífázový stykač, kterým se pouští nebo odstavuje přívodní napájení pro daný transformátor. K sekundární straně transformátoru jsou připojeny dvě kovové čelisti, ve kterých jsou vyfrézované díry, do nichž se umísťuje měřený objekt, a také jsou zde díry pro měřicí napěťové vedení.

Regulační část

Změnu napětí na třífázovém regulovatelném transformátoru určuje uživatel, který obsluhuje měřicí pult. Na měřicím pultu jsou umístěny čtyři tlačítka, která jsou párově oddělena. První pár tlačítek slouží k ovládání stykače, který zapíná nebo vypíná přívodní napájení. Druhý pár tlačítek umožňuje zvyšovat či snižovat napětí na transformátoru za pomoci servopohonu. Velikost zvýšení a snížení napětí je závislá na délce stisknutí těchto tlačítek.

Měřicí část

V měřicí části se získáváme okamžité hodnoty napětí na koncích tyče, okamžité hodnoty proudu tekoucí tyčí a povrchovou teplotu tyče. Tyto údaje jsou zaznamenávány každou sekundu, a to za pomoci následujících komponentů:

MU 1221

Externí modul MU 1221 má velkou škálu napěťových a termočláňkových rozsahů, a to při vysokém rozlišení. Aby bylo možné tento modul používat, je potřeba k němu připojit externí zdroj, který má na výstupu DC 24V.

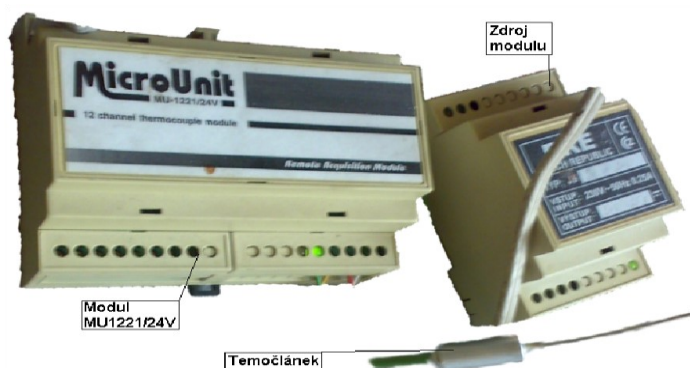
Vstupy modulu jsou řešeny analogově na bázi A/D převodníku AD7711. Funkci modulu zajišťuje procesor Atmel typu AT89C52, který má na starosti převodník a vstupy multiplexoru. Správné fungování tohoto procesoru zajišťuje obsluha počítače, která pomocí sady makroinstrukcí procesor naprogramuje. Programování probíhá za pomoci komunikační linky.

Instalovaný firmware zajišťuje autonomní měření analogových vstupů podle předem naprogramovaných požadavků a výsledky ukládá do tabulky umístěné v interní paměti RAM.

Deska, která je uvnitř modulu MU1221 je kompatibilní se stavebnicí MicroUnit a je do ní implementován komunikační protokol AIBus-2. Tento modul dokáže komunikovat s termočláňky typu M, T, J, L, E a K s chybou numerické linearizace $< 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u typů S, R, B, A je chyba numerické linearizace $< 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každý typ termočláňku má svůj unikátní programovací kód, který je k nalezení v manuálu tohoto zařízení.[5]

Modul MU-1221 obsahuje:

- galvanicky oddělené obvody A/D převodníku,
- šest diferenciálních vstupů,
- šest jednoduchých výstupů,
- dva digitální vstupy,
- dva digitální výstupy,
- čidlo studeného konce termočlánu,
- obvody komunikační linky RS485. [5]



Obrázek 3.3: Modul MU1221 s napájecím zdrojem a termočlánek [4]

Termočlánek typu K

Termočlánek typu K je měřicí sonda teploty, která je připojena k modulu MU1221 fyzicky a také musí být tento modul správně nastaven za pomoci správného programovacího kódu, jelikož by mohlo dojít k situaci, kdy by nám chodila zkreslená data.

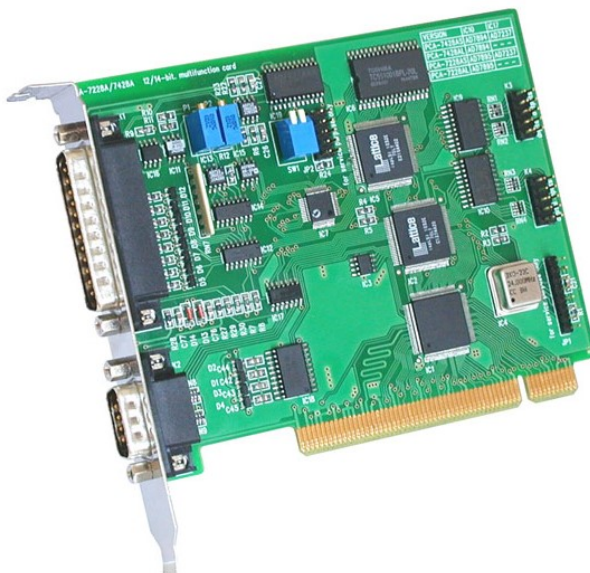
Termočlánek, který používáme k měření je složený z NiCr-NiAl s měřícím rozsahem 0 až 1100 °C dlouhodobě, -180 °C až +1350 °C krátkodobě a měrná tepelná závislost je v rozsahu teplot 100 °C až 1000 °C v rozmezí 39 až 43 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Termočlánek je připojen k měřenému objektu za pomoci kovové stahovací objímky. [4]

PCA 7228As

Karta je určena hlavně pro průmyslové automatizace a laboratorní systémy. Je nutná instalace do počítače, který disponuje PCI slotem s napájením 5 V a frekvencí 33 MHz. Její parametry lze jednoduše nakonfigurovat, hardwarově se nemusí vůbec nastavovat a její funkce jsou až na výjimky ovládány plně softwarově.

Parametry karty jsou: typ ADC 12 bitů / 100kHz, počte DAC 2x12 bit, datový zásobník 64 kB, karta není izolována. [7]

Karta PCA 7228As se používá pro měření napětí a proudu. Napětí je měřeno přímo, ale proud je měřen nepřímou. U proudu je použit měřicí transformátor proudu spolu s odporovým drátkem, ze kterého je snímáno napětí. Obě napětí jsou poté přes svorkovnici spojeny s kartou, která pomocí uvedených programů uvádí číselnou velikost těchto dvou veličin.



Obrázek 3.4: Měřicí karta PCA-7228A [7]

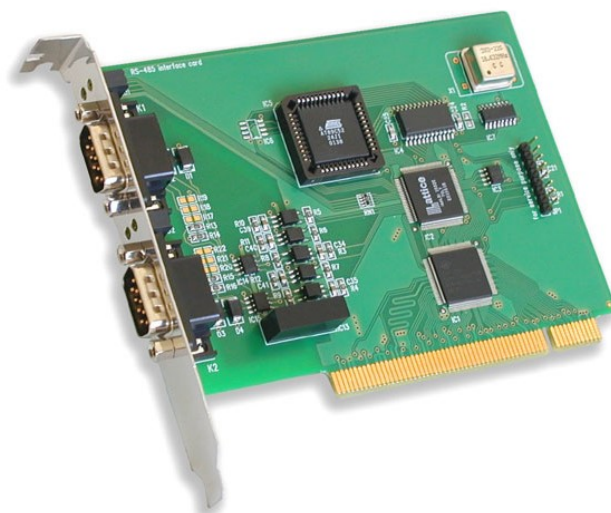
PCI - 1052

Jedná se o komunikační kartu se dvěma porty standardu RS-485 určenou pro podporu stavebnic externích modulů distribuovaných systémů monitorování a řízení technologických procesů MicroUnit serie. Karta PCI-1052 musí být zapojena a nainstalována do kompatibilního počítače s PCI slotem s napájecí podporou 5 V a frekvencí 33 MHz. Mezi přednosti této karty patří hlavně autonomní obsluha komunikační linky a také jednodušší podpora ze strany programu, což má za následek absenci zvláštních nároků na přesné časování RS-485 s protokolem AIBus-2. [6]

Karta PCI-1052 obsahuje:

- řídicí mikropočítač s integrovaným radičem komunikační linky a dvojími opticky oddělenými budiči standardu RS-485,
- dvoubránovou paměť pro obousměrný přenos příkazů a dat mezi PC a řídicím mikropočítačem umožňující současný oboustranný přístup,
- programovatelnou logiku přerušení se širokou podporou kanálů přerušení,
- firmware s podporou komunikačního protokolu AIBus-2. [6]

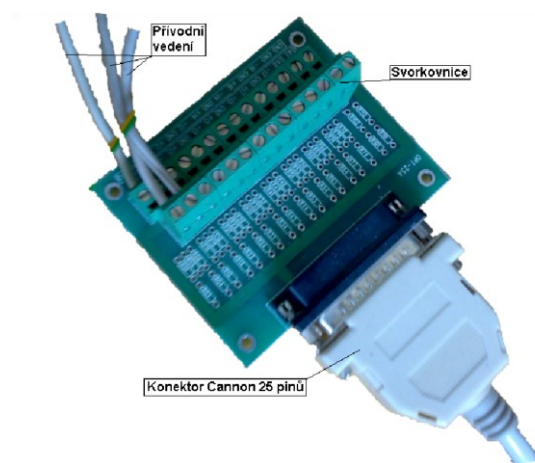
Tato karta je využívána pro laboratorní měření ke komunikaci s modulem MU1221 přes komunikační kanál RS-485 a výstupní hodnoty karty PCI-1052 se dále promítají do počítače, který je umístěn v učebně s patřičným programem.



Obrázek 3.5: Měřicí karta PCI-1052 [6]

Svorkovnice

Svorkovnice, jež můžeme vidět na obrázku 3.6, nám převádí informace z přívodního vedení na standardní 25pinový konektor Cannon. Přívodním vedením je míněno drátové vedení z čelistí laboratorního modelu měřící napětí a vedení z měřicího transformátoru proudu. Tato přívodní vedení musí být zapojena na patřičné svorky podle manuálu karty.



Obr. 3.6: Svorkovnice [4]

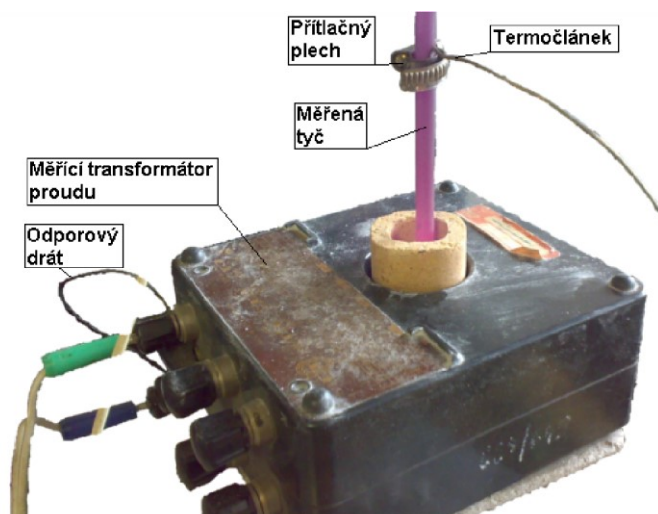
Měřicí transformátor proudu

Obecně má měřicí transformátor proudu (MTI) primární vinutí tvořené malým počtem závitů (zpravidla jedním) a je zapojeno do série s měřeným objektem. Sekundární vinutí je tvořeno velkým počtem závitů. Zátěž sekundárního vinutí má obvykle malý odpor, a z tohoto důvodu MTI pracuje po většinu času poblíž stavu nakrátko. Kdyby se MTI ocitl ve stavu naprázdno, mohlo by dojít k jeho zničení. Aby byl přístroj schopen pracovat s udávanou přesností a aby nedošlo k jeho destrukci, musíme ho provozovat pouze v mezích, na které je přístroj konstruován. [8]

V laboratorní úloze se používá víceúčelový měřicí transformátor proudu v průchozím provedení. Na primární vinutí působí pouze magnetické pole, které se vytvoří okolo měřené tyče a k sekundární straně MTI je připojen odporový drát, a to pro převedení výstupního proudu na napětí. Použitý odporový drát je konstantanový, jelikož drát vyrobený z tohoto materiálu má minimální závislost odporu s měnící se teplotou, a to je důležité pro stabilní převod během měření. Proud, který může protékat tímto odporovým drátkem při laboratorním měření by neměl překročit více než 5 A, což je dáno převodem přístroje.

Kvůli vysokým teplotám byla vložena mezi měřicí transformátor a ohříváný materiál izolační keramická trubice, která zabraňuje tepelnému poškození obalu MTI. Dále byl použit přitlačný plech, který má za úkol přidržet termočlánek typu K na měřené tyči.

Jediná čitelná informace, která se lze dozvědět ze štítku přístroje je ta, že má MTI převod 1:500, maximální proud 5 A na sekundárním vinutí při maximálním měřeném proudu 2500 A, a jakákoliv jiná technická zpráva vypovídající o tomto přístroji nebyla bohužel nalezena. Pro ověření převodu transformátoru byl použit klešťový ampérmetr, který převod potvrdil.



Obr. 3.7: Měřicí transformátor proudu a upevnění termočlánu [4]

Laboratorní počítač

Jedná se o starší model s nainstalovaným Windows XP z roku 2002. Aby bylo zachováno stávající nastavení počítače, bylo potřeba na daný systém doinstalovat aplikační rámec .NET framework, který umožňuje spuštění aplikace Přímý odporový ohřev 2021. Úkolem programu Přímý odporový ohřev 2021 je v reálném čase zobrazovat probíhající průběh měření a všechny naměřené a vypočítané hodnoty uložit do textového souboru na pevný disk počítače pro následné uplatnění při laboratorních úlohách.

5. Přímý odporový ohřev – starý program

5.1 Popis starého programu

Obr.4.1: Program přímý odporový ohřev

Program Přímý odporový ohřev od Petra Zemánka z roku 2004 je vytvořený ve vývojovém prostředí Visual Basic 6.0 a ve stejnojmenném jazyce Visual Basic je napsaný jeho zdrojový kód. Program je určen pouze pro 32bitové operační systémy s Windows XP.

Program potřebuje pro své spuštění měřicí kartu PCA 7228As, ze které získává okamžité hodnoty napětí a proudu. V průběhu měření používá i kartu PCI 1052, ze které získává aktuální informace o teplotě. Následně jsou tyto získané informace použity k matematickým výpočtům, které blíže informují o průběhu měření a jsou prezentovány v levé části obrázku 4.1.

Do pravé části obrázku uživatel vkládá z předem vytvořeného souboru materiál. Textový soubor s těmito informacemi musí být přesně definovaný.

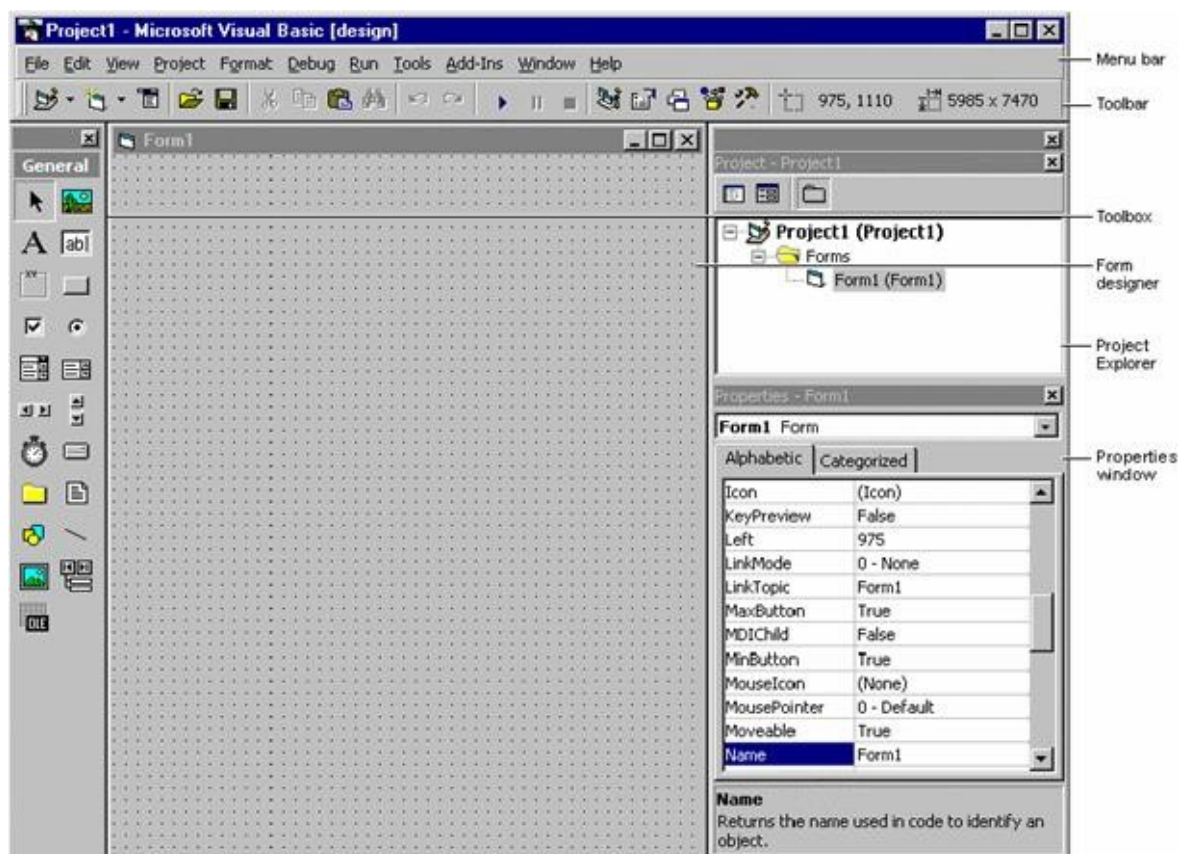
Střední část obrázku 4.1 slouží především ke správě měření a následnému ukládání dat do textového souboru. Funkce tlačítek se postupně odemykají a uzamykají, záleží na tom, v jaké fázi se program momentálně nachází. Dále zde můžeme vidět i počet naměřených vzorků a stopky. Velikost aplikační paměti je omezena, tudíž by měření nemělo trvat déle než 1 h a 23 minut. Jako poslední zde můžete vidět textbox s názvem Záznam všech veličin, který slouží jako místo pro vložení hesla. Se správným heslem může uživatel uložit všechny naměřené a vypočtené veličiny, které se prezentují na levé straně obrázku 4.1. V opačném případě program uloží pouze efektivní hodnoty napětí a proudu spolu s údaji o naměřené teplotě v čase.

Nejprve musí uživatel načíst předem připravený materiál a následně zapnout měření. Program každou sekundu sejme z karet předem nastavený počet okamžitých hodnot napětí a proudu a vypočte z těchto hodnot efektivní hodnotu. Následně jsou z efektivní hodnoty napětí a proudu počítány každou sekundu výpočetní veličiny. Ovšem ve zdrojovém kódu, který se týká úseku pro výpočet výpočetních veličin, se nachází podmínka, ve které je napsáno, že se teplota musí

zvyšovat, jinak aplikace výpočetní veličiny nepřepočte a v tomto případě aplikace prezentuje poslední hodnoty, při kterých nastala tato změna teploty. Po ukončení měření program provede lineární aproximaci naměřené teploty a následně tyto aproximované teploty použije pro přepočet výpočetních hodnot, které může uživatel uložit do textového souboru pro další využití.

5.2 Visual Basic 6.0

Visual Basic je programovací jazyk od společnosti Microsoft, který vznikl v roce 1991 a jeho poslední verze Visual Basic 6.0 byla vydána roku 1998. Jedná se o událostmi řízený programovací jazyk s integrovaným vývojovým prostředím (IDE). Různé mutace tohoto programu se používají například k programování samostatných aplikací, pro tvorbu maker v balíku programu Microsoft Office a při programování internetových aplikací. Podpora jazyku Visual Basic 6.0 od Microsoftu skončila v březnu roku 2008 a následníkem tohoto programu je Visual Basic. Net., který se nadále vyvíjí. [9]



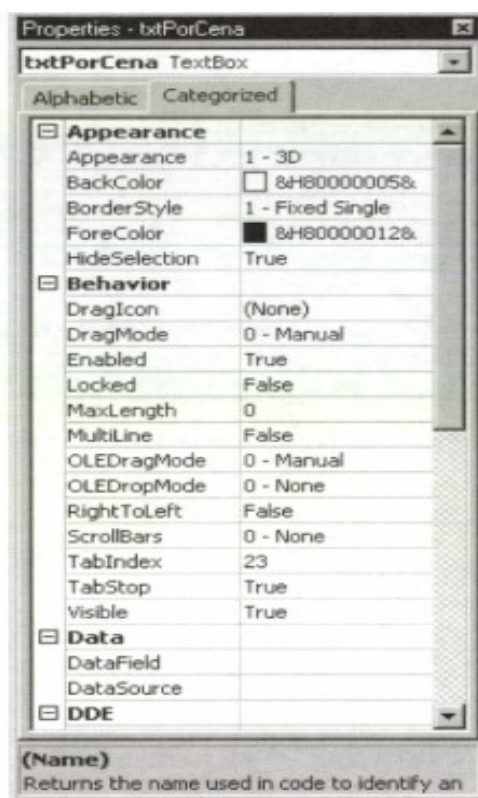
Obr. 4.2: Program Visual Basic verze 6.0 [10]

- Menu bar – hlavní menu nám umožňuje základní práci s programem Visual Basic. Toto menu obsahuje standardní příkazy File, Edit, View, Window, Help a dále příkazy specifické, jako jsou Project, Format, Debug a další.
- Toolbar – pomocí nástrojové lišty se rychle provádějí příkazy v IDE. Při použití některé z ikon v liště se vykoná akce, která je tlačítkem reprezentována. Obsah nástrojů v nástrojové liště je možno individuálně upravovat.

- Toolbox – okno nástrojů obsahuje soubor nástrojů, který se využívá hlavně v době návrhu pro umístění ovládacích prvků při vytváření Formu. Charakter ovládacích prvků se může kdykoliv měnit.
- Form designer – Form slouží pro vývoj uživatelského rozhraní pro vytvářenou aplikaci.
- Project Explorer – zde je obsažen seznam forem a modulů v otevřeném projektu.
- Properties window – obsahuje seznam vlastností pro vybrané formy ovládací prvky. [10]

K popularitě tohoto programovacího jazyka přispěla jeho jednoduchá syntaxe, snadná tvorba uživatelského rozhraní a velká variabilita a flexibilita jazyka. V programu Visual Basic 6.0 se využívá velké množství předdefinovaných objektů, mezi které patří formuláře, textové pole pro zadávání dat, příkazová tlačítka, menu, popisky a mnoho dalších. Všechny tyto objekty můžeme sbalit do jedné skupiny, která se nazývá ovládací prvky. [10]

Každý ovládací prvek má definovány své vlastnosti, metody a události. Pomocí vlastností ovládaného prvku jsme schopni nastavovat vzhled a chování ovládacího prvku v aplikaci. Například u textového pole je možno nastavit font, který bude v poli zobrazen, velikost, umístění ve formuláři, název, pomocí něhož se na ovládací prvek bude odkazovat programový kód a mnoho dalších. Tyto vlastnosti můžeme kategorizovat do skupin, které jsou nastíněny v obrázku 4.3. [11]



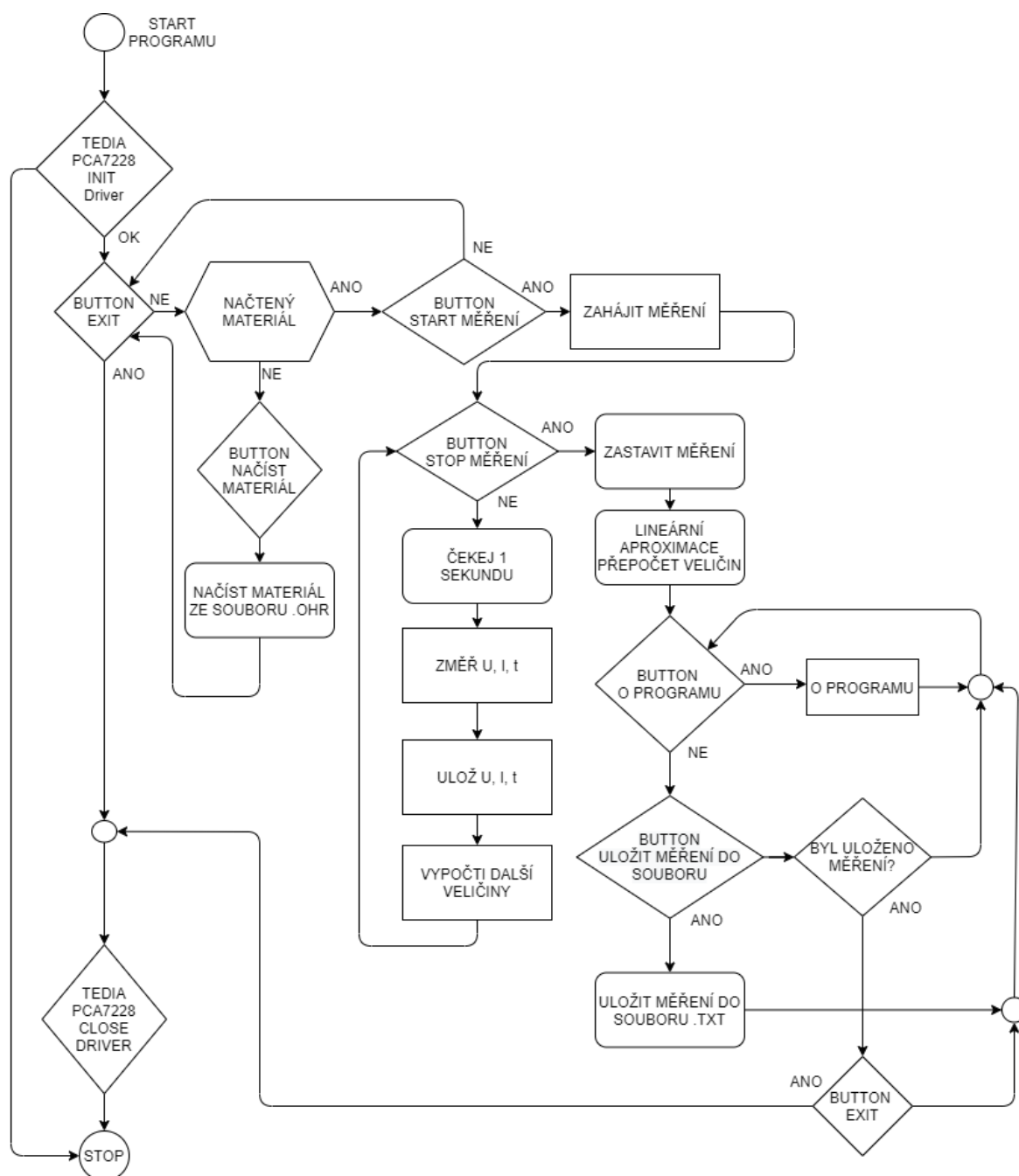
Obrázek 4.3.: Okno vlastností textového pole [11]

Pomocí metod ovládacích prvků nastavujeme pro daný ovládací prvek činnost, kterou může vykonávat, případně činnosti, které mohou být vykonány na něm. Jestliže zůstaneme u příkladu textového pole, můžeme u něj najít definované metody, jako jsou např.: Refresh (obnovení zobrazovaných dat), nebo SetFocus (umístění fokusu – tj. zaměření – na textové pole). [11]

Události jsou taky předem definovány u všech ovládacích prvků a slouží k programování procedur, které se vykonají jako odezva na výskyt určité události. Jinými slovy, když uživatel založí

událost Click a k této události napíše proceduru, která bude přiřazena k události Click, tak se procedura provede vždycky, když uživatel klikne na tlačítko Click. [11]

5.3 Popis měření starého programu



Obr. 4.4: Vývojový diagram popisující původní program

Po spuštění aplikace Přímý odporový ohřev program testuje, zdali se inicializovala pouze karta PCA7228As a v případě její odpovědi je program následně schopen fungování. V případě selhání inicializace karty PCA7228As program přestane fungovat a ukončí se. Před spuštěním samotného měření program vyžaduje, aby byly načteny vlastnosti materiálu z externího textového dokumentu. Textový dokument materiálu se otevírá v programu WordPad MF, ve kterém se dá

případně upravit či vytvořit nový materiál. Je zde důležité, při vytváření nového materiálu, dodržet pořadí vkládaných informací. Po načtení těchto hodnot program umožní, aby uživatel mohl kliknout na tlačítko Start měření.

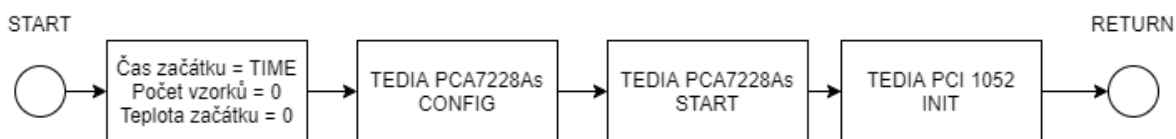
Po kliknutí na tlačítko Start měření se nakonfigurují analogové vstupy karty PCA7228As a na těchto vstupech se nastaví frekvence měření na hodnotu 10 kHz, inicializují se pracovní proměnné a teprve v tento moment se inicializuje ovladač karty PCI 1052, který následně získává data za pomoci termočlánu typu K. Tento děj je popsán obrázkem 4.5.

Dokud uživatel nezastaví měření kliknutím na tlačítko Stop měření, měřicí smyčka se bude stále opakovat. Měřicí smyčka každou sekundu získává teplotu a zároveň ukládá okamžité hodnoty napětí a proudu. Z naměřených hodnot vypočítává efektivní hodnotu napětí a proudu a počítá další veličiny, které jsou prezentovány v levé části programu.

Stisknutím tlačítka Stop měření se ukončí periodické měření napětí a proudu kartou PCA7228As a deinicializuje se ovladač karty PCI1052. Pro zvýšení přesnosti se provede lineární aproximace naměřené teploty v čase a podle aproximované teploty se přepočtou ostatní veličiny.

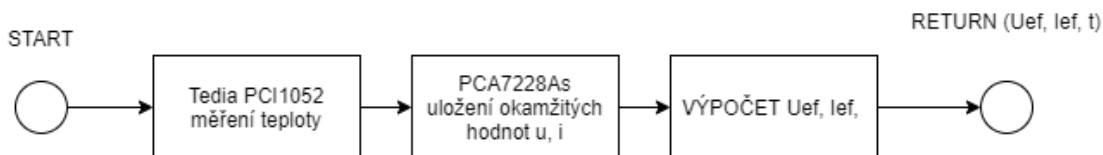
Následně se povolí funkčnost tlačítka Uložit do souboru. Po stisknutí tohoto tlačítka se uloží hodnoty napětí, proudu a teploty v čase. V případě vložení hesla na patřičné místo a kliknutí na tlačítko Uložit do souboru se uloží nejenom naměřené, ale i všechny vypočtené veličiny do textového souboru pro další zpracování dat.

V případě ukončení programu kliknutím na tlačítko Konec se deinicializuje karta PCA 7228As a program Přímý odporový ohřev se ukončí.



Obr. 4.5: Obrázek popisující postupnou konfiguraci měřících karet

Vyčtení naměřených hodnot U_{ef}, I_{ef}, t



Obr. 4.6: Obrázek popisující měření pomocí karet

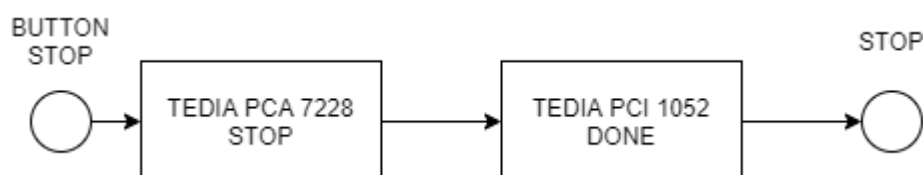
Při běhu měření, se každou sekundu skrz kartu PCI1052 dotazujeme modulu MU1221 na teplotu termočlánu. Povinným parametrem dotazů je mimo jiné typ připojeného termočlánu. Modul vrací naměřenou teplotu ve 4 bajtech ve formátu podle AIBUS-2. Teplota se musí nejprve pro další použití převést z tohoto formátu a po převedení se zobrazuje na patřičném místě v programu. Rozdíly teplot jsou v programu značeny jako Delta T a tyto naměřené rozdíly se dále používají pro výpočet ostatních veličin. Následně z karty PCA7228As se vyčte prvních 1200

naměřených okamžitých hodnot napětí a proudu odpovídajícím 6 periodám v 50Hz síti. Zbylé naměřené hodnoty se zahodí. Je možné, že je to z důvodu omezeného výkonu laboratorního počítače. Signál se dá považovat za periodický, tudíž z tohoto důvodu mají tato zahozená data minimální vliv na výpočet efektivní hodnoty. Výpočet efektivních hodnot pro napětí a proud se provádí podle následujících vzorců:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j \in N} (u_j)^2}, \quad (4.1)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j \in N} (i_j)^2}. \quad (4.2)$$

Ukončení měření karet



Obr. 4.7: Obrázek zobrazující ukončení měřicích karet

Po stisknutí tlačítka Stop měření se zastaví sběr dat z karty PCA 7228As a provádí se lineární aproximace teploty v čase. Následně se aproximovaná teplota použije na přepočet ostatních vypočtených veličin. Poté se dané hodnoty mohou uložit do textového souboru a následně s nimi může být libovolně zacházeno.

6. Přímý odporový ohřev – inovovaný program

6.1. Volba programovacího jazyka

Pro inovaci software jsem si vybral moderní, mezinárodně využívaný, jednoduchý, objektový programovací jazyk, který je typově bezpečný. Jedná se o jazyk C# (výslovnost Sharp), který umožňuje vytvářet velkou škálu zabezpečených a robustních aplikací, webových aplikací a stránek, formulářových aplikací ve Windows, software pro mobilní zařízení a spoustu dalších. Jazyk byl vyvinut v roce 2000 firmou Microsoft na bázi programovacího jazyka C++ a Java. [12]

Vlastnosti jazyka:

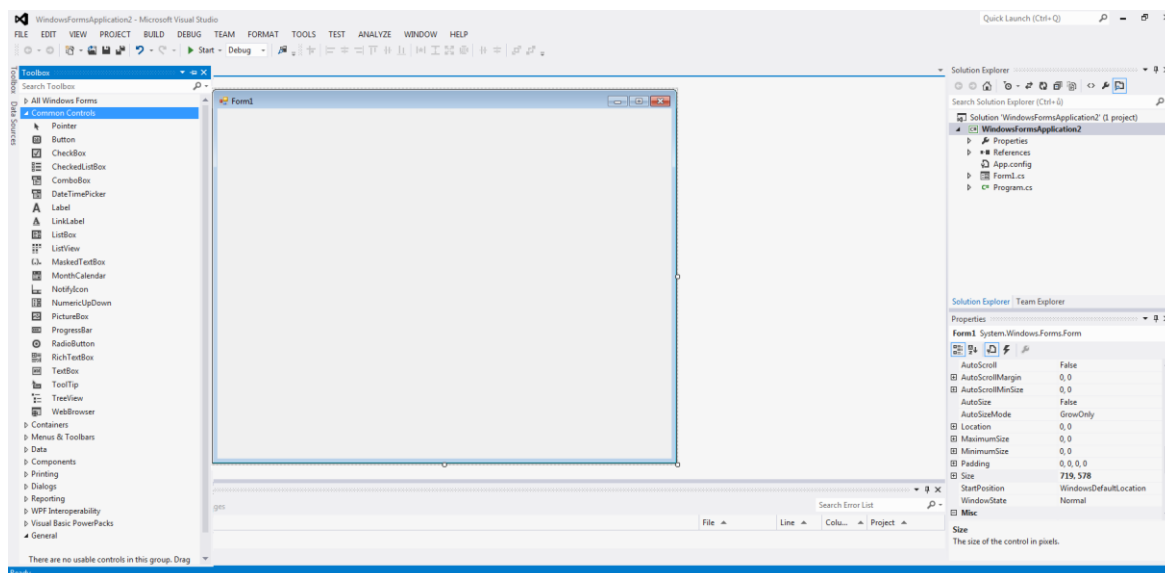
- Nepodporuje vícenásobnou dědičnost – každá vytvořená třída může být potomkem pouze jedné třídy, ale může se implementovat jakýkoliv počet rozhraní. Tímto se předchází komplikacím a složitostem.
- Všechny metody a globální proměnné musí být deklarovány uvnitř tříd.
- Jednodušší práce s datovým atributem při zachování principu zapouzdření.
- C# je typově bezpečnější než C++.
- C# nepotřebuje a ani neobsahuje dopřednou deklaraci – pořadí deklarace metod není důležitá.
- Je case sensitive – C# rozlišuje rozdíl mezi malými a velkými písmeny na rozdíl od programovacího jazyka Visual Basic.

Mezi vývojová prostředí, která se používají pro psaní zdrojových kódů v jazyce C#, jsem ze všech možných vybral pouze tři nejpoužívanější, mezi které patří:

- Microsoft Visual Studio – oficiální vývojové prostředí od firmy Microsoft určené pro operační systémy Windows.
- Visual Studio for Mac – jak už je z názvu patrné, toto vývojové prostředí je určené pro operační systémy macOS.
- Baltík – český programovací nástroj, který se využívá k vyučování dětí a mládeže. [12]

6.2. Volba vhodného vývojového prostředí

Vzhledem k rozhodnutí inovovat program v jazyce C# bylo následně zvoleno vývojové prostředí Microsoft Visual Studio od firmy Microsoft, jenž je hojně využíváno právě pro vývoj a zdokonalování desktopových aplikací.



Obr. 6.1: Vývojové prostředí Visual Studio

Toto vývojové prostředí je podobné Visual Basicu 6.0 a taktéž se jedná o integrované vývojové prostředí IDE, které obsahuje nástroje k vývoji, návrhu a ladění aplikací a služeb. Používá se nejenom k vytváření desktopových aplikací, ale také pro vytváření konzolových aplikací s grafickým rozhraní, na webové stránky či webové aplikace, jak ve strojovém kódu, tak v řízeném kódu, běžící na platformách Microsoft Windows, Windows Mobile, Windows CE, .NET., NET Compact Framework atd. Nejnovější verze, kterou lze stáhnout je Visual Studio 2019, která se neustále vyvíjí.

Mezi programovací jazyky, které jsou součástí Visual Studia patří C, C++, VB.NET a C#. Další programovací jazyky jako je Python, Ruby, Oxygene, JavaScript a další, je potřeba pomocí jazykových balíčků dodatečně stáhnout a nainstalovat.

Program obsahuje editor kódu, který disponuje funkcí IntelliSense. Pomocí této funkce lze při psaní kódu eliminovat značné množství chyb, jelikož tato funkce zvýrazňuje syntaxe a pomáhá dokončovat kód nejen pro proměnné, funkce a metody, ale také pro konstrukce jako cykly a dotazy. Tyto návrhy pro dokončení kódu se zobrazují ve vyskakovacím seznamu a pak je už jen na uživateli, kterou možnost si vybere. Je zde také podpora refaktorování včetně změny pořadí parametrů, přejmenování proměnných a metod, extrakci rozhraní a zabalení členů tříd uvnitř vlastností mezi ostatní. Hojně se využívá také funkce kompilace. Jde o funkci, která podtrhne pomocí např. červené vlnovky chybně napsaný kód a poskytuje informace o syntaktických a kompilačních vazbách v psaném kódu. Vývojové prostředí Visual studio disponuje velkou škálou funkcí a prvků. Poslední, který bych rád zmínil, a který jsem dost často používal, je debugger. Jedná se softwarový nástroj, který jsem používal při ladění a hledání chyb. Tento prvek umožňuje používání takzvaných breakpointů. Pomocí breakpointu je umožněno zastavit běh programu na libovolné pozici a dále postupovat programem po krocích. Tímto způsobem se dá velice jednoduše zjistit chyba, jelikož se zobrazují aktuální hodnoty proměnných, na které můžeme následně reagovat. [13]

6.3. Vývoj a popis inovovaného programu

Mým úkolem bylo inovovat laboratorní program, který využívají studenti v předmětu Energetické problémy elektrotepelných zařízení tak, aby byl program schopen fungovat i na jiných operačních systémech. Protože je starý program napsán, dnes už v zastaralém jazyku, a i vývojové prostředí se už dlouhou řadu let aktivně nepoužívá, podpora od firmy Microsoft a možnost přenést program na jiné zařízení tu tedy nepřipadá v úvahu, jelikož by program nešel spustit. Starý program byl zkrátka vázán na dnes již zastaralý Windows XP.

V dnešní době má většina uživatelů na svých zařízeních nainstalované operační systémy Windows 10, ale je vyvinuta řada aplikací ve vývojovém prostředí Visual Basic 6.0, které je potřeba nadále spravovat. Z tohoto důvodu byla vyvinuta metoda, která umožní spustit tento postarší program i na novějších běžně používaných operačních systémech. Pomocí této metody jsem byl schopen otevřít vývojové prostředí Visual Basic 6.0 spolu se starým zdrojovým kódem od programu Přímý odporový ohřev na mém osobním počítači a tím jsem získal přístup i ke zdrojovému kódu, který jsem následně deklodoval. Bohužel zdrojový kód byl napsán velice nepřehledně. V kódu se vzájemně prolínaly části, které získávaly data, zpracovávaly je, různě formátovaly a zobrazovaly. Funkce s výpočty byly pro mě k deklodování velice obtížné. K pochopení části kódu jsem musel porozumět kódu celého programu.

Firma Microsoft bohužel nepodporuje přenositelnost kódu z jednoho vývojového prostředí do druhého, tudíž jsem musel svůj program nejprve vizuálně navrhnout ve vývojovém prostředí Visual Studio. Poté jsem ho začal psát v jazyce C#, jelikož je to momentálně nejpopulárnější programovací jazyk pro desktopové aplikace a troufám si říct, že podpora pro můj zvolený jazyk od firmy Microsoft tu bude s námi ještě dlouhá léta.

Druhá nemilá překážka byla s měřicími kartami PCA 7228As a PCI 1052, přesněji s jejich knihovnami. Tyto dvě měřicí karty byly vyvinuty firmou Tedia a jejich funkce byly popsány v programátorských jazycích Visual Basic, Delphi, Pascal a C/C++. Moje neznalost těchto jazyků mi bránila vyvíjet můj program v nabízených jazycích, dokonce si dovoluji tvrdit, že by to v některých zmiňovaných programátorských jazycích s největší pravděpodobností ani nešlo realizovat, a to z důvodu snímání okamžitých hodnot v reálném čase za pomoci karet. Tudíž jsem musel dojít na způsob, jak si knihovnu přizpůsobit k mým potřebám. Využil jsem návod ke knihovně napsaných v programátorském jazyce Pascal a Visual Basic a vytvořil jsem si vlastní wrapper pro volání knihovních funkcí pro obě měřicí karty v programátorském jazyce C#, které jsem nadále používal při programování.

Z důvodu lepší čitelnosti jsem aplikaci rozdělil do několika vrstev. Uživatel pracuje pouze s vrstvou grafického rozhraní GUI (třída Form1 a třída AboutBox1). Na opačném konci je vrstva pro přístup k hardwaru skrz interface PCA7228 a PCI1052. Rozhraní používají třídy HW_PCA7228 a HW_PCI1052. Pokud nejsou v počítači měřicí karty, rozhraní použije třídy SW_PCA7228 a SW_PCI1052, které představují virtuální karty pro potřeby testování. Vrstvu uprostřed představuje třída MatParam, jež popisuje vlastnosti materiálu použitého pro měření, a třída PrElOh, která obsluhuje měření a provádí výpočty.

Tímto rozdělením lze relativně snadno použít místo grafického rozhraní (GUI) textové rozhraní (CLI) a provádět měření z příkazového řádku. Případně jde z druhé a třetí vrstvy vytvořit knihovnu a provádět měření z jiného programu, například přes webové rozhraní.

Obr. 6.2: Přímý odporový ohřev 2021

Vizuální výsledek mé práce můžete vidět na obrázku 6.2. Do bílých textboxů má uživatel možnost vepisovat údaje. Šedé textboxy slouží pouze pro čtení. Takové rozčlenění jsem zvolil z důvodu fungování programu, jelikož bílá políčka, do kterých vepisuje informace uživatel, jsou dostatečně chráněna proti nechtěným znakům, které by mohly způsobit výjimku a okamžité ukončení programu. Program nyní ukazuje aktuální průběh ohřevu, a to i v případě, kdy teplota měřeného materiálu zůstává konstantní. Následně se po ukončení měření provede aproximace teploty a program umožní uživateli uložit tyto aproximované výsledky do textového souboru. Tímto způsobem jsou řešeny případné chyby při měření, aby výsledné hodnoty uložené v textovém souboru a následně použité v programu Excel pro grafické zobrazení průběhu měření, pokud možno, nebyly diskrétní.

Do levé části programu uživatel zadává informace týkající se ohřívání materiálu. Uživatel už nemusí složitě vytvářet externí textový soubor s informacemi o měřeném materiálu a následně soubor vkládat do programu, ale nyní má možnost zadat tyto hodnoty přímo do programu před měřením a následně je uložit pro možné příští použití. Po zadání délky vnitřního nebo vnějšího průměru v jednotkách, které jsou uvedeny vedle místa zadávání, program automaticky dopočítá povrch a hmotnost. Dále v této části programu můžete najít ΔT a aktuální teplotu měřeného objektu pomocí měřicí karty PCI 1052.

Ve střední části obrázku 6.2 jsou každou sekundu prezentovány aktuální hodnoty vypovídající o průběhu měření. Uživatel zde nemá možnost zasahovat. Prováděné výpočty a následná prezentace vypočtených veličin se může upravovat pouze ve zdrojovém kódu programu. Veškeré výpočty týkající se této části jsou publikovány v předposlední kapitole mé diplomové práce.

V pravé horní části obrázku 6.2 se nachází stopky a počet vzorků, které měřicí karty zpracovaly. Zde bych chtěl zdůraznit, že maximální počet vzorků, které program dokáže zpracovat,

už není omezen na 5 000, jako u starého programu (což odpovídalo zhruba 1 h a 23 minutám na jedno měření), ale počet vzorků omezuje dostupná operační paměť počítače.

Dále se zde nachází textbox a checkbox s názvem Záznam všech veličin. V případě vepsání hesla do textboxu, které jsem nastavil na heslo, potvrzení checkboxu a následným kliknutím na tlačítko Uložit do souboru, může uživatel uložit vypočtené hodnoty do textového souboru v následující podobě:

Výstup programu Přímý odporový ohřev

Naměřené hodnoty ze dne: 4/20/2021
Začátek měření v: 4/20/2021 10:05
Měření trvalo: 835 sekund
Interval měření: 1 sekunda
Počet uložených vzorků: 835

Napětí uef	Proud Ief	CosFí	Přiklon	odpor	Teplota	Tepló	uz.teplo	Ztr.výkon	Alfa	M.spotřeba	Spotřeba
0.002687	1.958	1.00	0.005261	0.001372	19.43	0.01	4.41	-4.4055	-922.582	0.000	0.000
0.343297	101.666	1.00	34.901633	0.003377	19.48	34.90	4.41	30.4908	5642.733	0.050	0.010
0.350433	104.946	1.00	36.775542	0.003339	19.54	36.78	5.29	31.4836	5113.029	0.102	0.020
0.418231	141.228	1.00	59.065928	0.002961	19.59	59.07	4.41	54.6351	8054.291	0.185	0.036
0.601778	243.683	1.00	146.640068	0.002470	19.65	146.64	5.29	141.3501	18747.141	0.393	0.077
0.819267	373.683	1.00	306.146150	0.002192	19.70	306.15	4.41	301.7354	36940.518	0.827	0.162
0.988496	471.436	1.00	466.010200	0.002097	20.05	466.01	5.29	410.4366	25332.800	1.807	0.367
0.994320	468.095	1.00	465.436220	0.002124	20.95	465.44	54.69	410.7423	17203.072	2.147	0.421
1.001480	465.742	1.00	464.431206	0.002150	21.58	464.43	55.58	410.8553	12921.855	2.808	0.550
1.006346	462.061	1.00	464.993239	0.002178	22.20	464.99	54.69	410.2994	10365.265	3.467	0.680
1.011661	458.950	1.00	464.101818	0.002204	23.57	464.10	120.86	413.4480	6964.785	4.124	0.809
1.017835	456.514	1.00	464.653927	0.002230	24.93	464.66	119.97	344.6823	4668.786	4.783	0.938
1.023319	453.485	1.00	464.059817	0.002257	26.30	464.06	120.86	343.2040	3767.077	5.447	1.067
1.027691	450.003	1.00	462.464033	0.002284	28.17	462.46	164.96	297.5003	2595.868	6.096	1.195
1.033000	447.208	1.00	461.963798	0.002310	30.03	461.96	164.08	297.8822	2158.899	6.750	1.323
1.038301	444.134	1.00	461.379027	0.002337	31.90	461.38	164.96	296.4153	1835.641	7.404	1.451
1.042801	441.235	1.00	460.146773	0.002364	34.07	460.15	191.43	268.7182	1423.696	8.056	1.579
1.047700	438.068	1.00	458.963844	0.002392	36.23	458.96	190.55	268.4175	1243.105	8.706	1.707
1.052575	435.340	1.00	458.228001	0.002418	38.40	458.23	191.43	266.7995	1097.221	9.356	1.834
1.057018	432.207	1.00	456.850575	0.002446	40.80	456.85	211.72	245.1324	896.874	10.003	1.961
1.061608	429.396	1.00	455.850229	0.002472	43.20	455.85	211.72	244.1320	804.448	10.649	2.088
1.065922	426.525	1.00	454.642381	0.002499	45.60	454.64	211.72	242.5042	728.109	11.293	2.214
1.070692	423.795	1.00	453.753916	0.002526	48.13	453.75	223.19	230.5676	630.949	11.936	2.340
1.075095	421.172	1.00	452.799911	0.002553	50.67	452.80	224.07	228.7315	575.644	12.578	2.466
1.079279	418.318	1.00	451.481833	0.002580	53.20	451.48	223.19	228.2956	531.982	13.218	2.591
1.083380	415.719	1.00	450.381850	0.002606	55.97	450.38	224.36	206.0235	444.064	13.856	2.718
1.088290	413.122	1.00	449.596541	0.002634	58.73	449.60	243.48	206.1206	413.371	14.493	2.841
1.093010	410.747	1.00	448.950576	0.002661	61.50	448.95	244.36	204.5925	383.532	15.129	2.966
1.096879	408.151	1.00	447.692263	0.002687	64.37	447.69	253.18	184.5126	341.545	15.763	3.090
1.101187	405.600	1.00	446.641443	0.002715	67.23	446.64	252.30	184.2439	320.992	16.396	3.214
1.105514	403.219	1.00	445.765250	0.002742	70.10	445.76	253.18	182.5846	300.204	17.028	3.338
1.109679	400.969	1.00	444.943270	0.002767	72.15	444.94	180.84	264.1006	395.790	17.658	3.462
1.113609	398.499	1.00	443.772075	0.002795	74.20	443.77	180.84	262.9284	379.287	18.287	3.585
1.117111	395.902	1.00	442.266479	0.002822	76.25	442.27	180.84	261.4258	363.697	18.914	3.708
1.120946	393.532	1.00	441.150540	0.002848	78.30	441.15	180.84	260.3079	349.614	19.539	3.830
1.125190	391.303	1.00	440.290223	0.002875	81.23	440.29	258.47	181.8176	232.689	20.163	3.953
1.128604	389.099	1.00	439.136888	0.002901	84.17	439.14	259.35	179.7839	215.698	20.785	4.075
1.132379	386.666	1.00	437.852458	0.002929	87.10	437.85	258.47	179.3798	209.766	21.405	4.196
1.136391	384.567	1.00	437.038478	0.002955	90.00	437.02	255.83	181.1923	201.251	22.025	4.318
1.139484	382.174	1.00	435.481158	0.002982	92.90	435.48	253.83	179.6350	193.588	22.642	4.439
1.142819	379.971	1.00	434.239876	0.003008	95.80	434.24	255.83	178.4119	184.985	23.257	4.559
1.146658	377.817	1.00	433.226886	0.003035	98.67	433.23	253.18	180.0472	179.951	23.871	4.680
1.150303	375.720	1.00	432.114699	0.003061	101.53	432.12	252.30	179.8192	173.481	24.483	4.800
1.153286	373.486	1.00	430.736375	0.003088	104.40	430.74	253.18	177.5565	165.548	25.094	4.919
1.157134	371.515	1.00	429.488149	0.003115	107.23	429.48	249.65	180.2394	162.648	25.703	5.039
1.160812	369.602	1.00	428.033611	0.003141	110.07	429.04	250.53	178.5052	158.985	26.311	5.158
1.163981	367.558	1.00	427.830528	0.003167	112.90	427.83	249.65	178.1795	153.082	26.917	5.277
1.166945	365.544	1.00	426.464718	0.003193	115.67	426.46	244.36	182.1066	149.985	27.523	5.395
1.170051	363.290	1.00	425.067828	0.003221	118.43	425.07	243.48	181.5919	145.408	28.124	5.513
1.173044	361.772	1.00	423.905756	0.003246	121.20	423.91	244.36	179.5472	139.872	28.724	5.631
1.175319	359.180	1.00	422.230098	0.003273	124.07	422.23	253.18	169.0304	128.096	29.322	5.748
1.178908	357.414	1.00	421.136224	0.003298	126.93	421.16	252.30	169.0607	124.707	29.920	5.865
1.182562	355.668	1.00	420.599461	0.003325	129.80	420.60	253.18	167.4198	120.297	30.516	5.982

Obr. 6.3: Výstup programu Přímý odporový ohřev pro pedagogy

Tento způsob ukládání je zde hlavně pro pedagogy, aby se nemuseli zbytečně zdržovat při kontrole laboratorní úlohy a urychlí to také vyhodnocování měření pro případné bakalářské či diplomové práce.

Druhý a odlišný způsob, co se týká počtu uložených dat, je určen pro studenty, kteří mají ve svém studijním programu zařazen předmět Energetické problémy elektrotepelných zařízení. Studenti neznají patřičné heslo, tudíž se jim naměřené výsledky uloží v následující podobě.

Výstup programu Přímý odporový ohřev

Naměřené hodnoty ze dne: 4/20/2021
Začátek měření v: 4/20/2021 10:05
Měření trvalo: 835 sekund
Interval měření: 1 sekunda
Počet uložených vzorků: 835

Napětí uef	Proud Ief	Teplota	CosFí
0.002687	1.958	19.43	1.00
0.343297	101.666	19.48	1.00
0.350433	104.946	19.54	1.00
0.418231	141.228	19.59	1.00
0.601778	243.683	19.65	1.00
0.819267	373.683	19.70	1.00
0.988496	471.436	20.33	1.00
0.994320	468.095	20.95	1.00
1.001480	465.742	21.58	1.00
1.006346	462.061	22.20	1.00
1.011661	458.950	23.57	1.00
1.017835	456.514	24.93	1.00
1.023319	453.485	26.30	1.00
1.027691	450.003	28.17	1.00
1.033000	447.208	30.03	1.00
1.038301	444.134	31.90	1.00
1.042801	441.235	34.07	1.00
1.047700	438.068	36.23	1.00
1.052575	435.340	38.40	1.00
1.057018	432.207	40.80	1.00
1.061608	429.396	43.20	1.00
1.065922	426.525	45.60	1.00
1.070692	423.795	48.13	1.00
1.075095	421.172	50.67	1.00
1.079279	418.318	53.20	1.00
1.083380	415.719	55.97	1.00
1.088290	413.122	58.73	1.00
1.093010	410.747	61.50	1.00
1.096879	408.151	64.37	1.00
1.101187	405.600	67.23	1.00
1.105514	403.219	70.10	1.00
1.109679	400.969	72.15	1.00

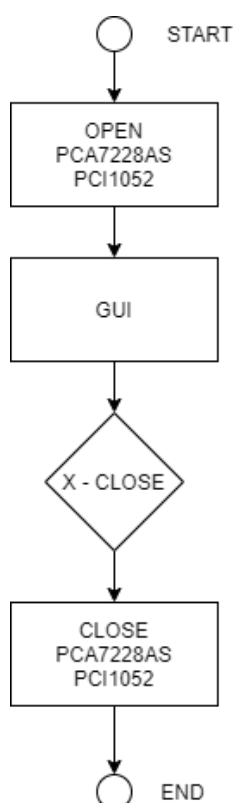
Obr. 6.4: Výstup programu Přímý odporový ohřev pro studenty

V období psaní této diplomové práce byl ve světě rozšířen virus COVID-19, což značně znepříjemnilo cestování napříč republikou a z důvodu možného neúmyslného poškození měřicích karet jsem v programu vytvořil softwarové karty, pomocí kterých jsem program mohl vytvářet a následně testovat na mém osobním počítači. Z tohoto důvodu jsem do programu zabudoval textbox, ve kterém se vypisují aktuální používané karty. V případě správného zapojení měřicích karet program vypíše PCI 1052 = TEDIA a PCA 7228 = TEDIA, v případě absence měřicích karet program vypíše PCI 1052 = VIRT, PCA 7228 = VIRT. Tato periferie zde neslouží jenom k testování programu. Také nalezne uplatnění v případě výměny aktuálního laboratorního počítače za jiný a poslouží i pro následnou kontrolu funkčnosti měřicích karet. Program z roku 2004 byl v tomto ohledu značně nedostačující, jelikož při absenci jedné z měřicích karet, na které byl program vázán, se program bez bližšího konkrétního důvodu ukončil.

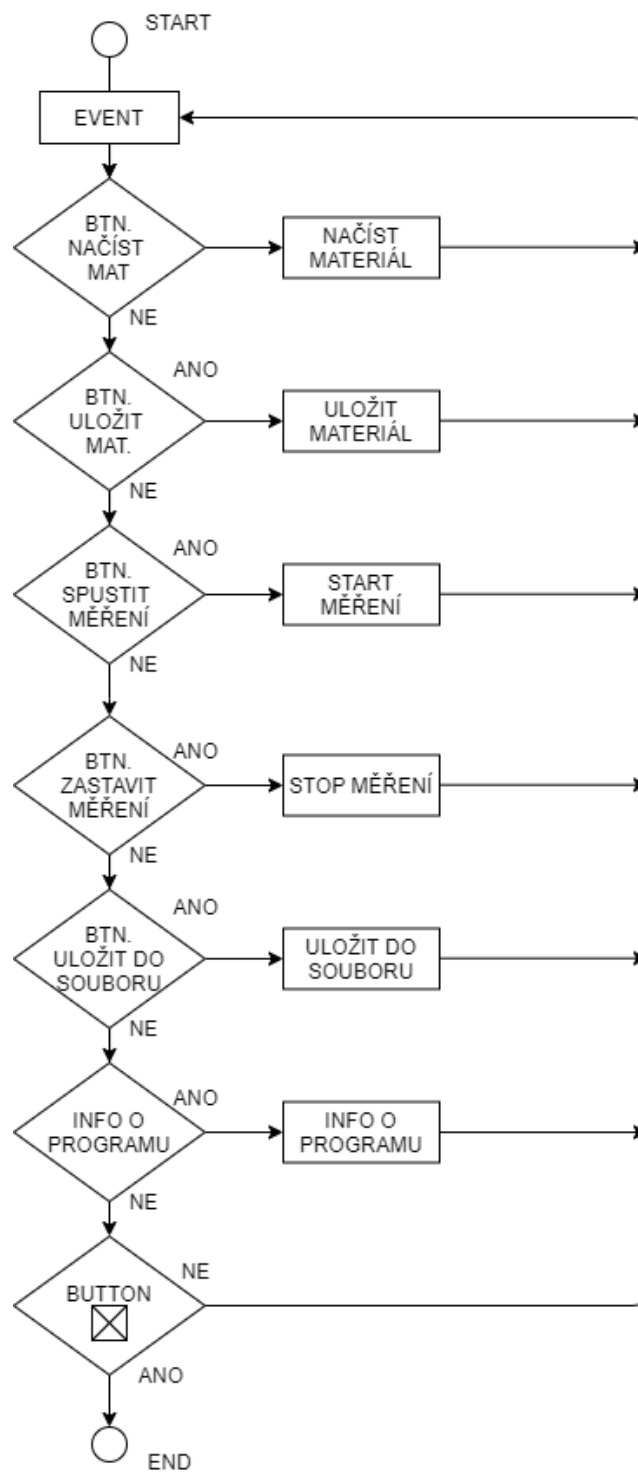
Po stisknutí tlačítka Start měření se nakonfiguruje měřicí karta na periodické měření napětí a proudu s frekvencí 10 kHz a aplikační časovač na vyvolání události s periodou 1 s.

Tlačítkem Stop měření zastavíme časovač, měření okamžitých hodnot napětí a proudu. Poté se odemkne tlačítko Uložit do souboru pro uložení naměřených dat.

Po ukončení měření se musel program Přímý odporový ohřev z roku 2004 vypnout a následně znovu zapnout pro možnost dalšího měření. Nyní je program po zastavení měření a následném uložení výsledků znovu připraven plnit svou funkci. Proto jeho provoz při správném zapojení měřicích karet je popsán obrázkem 6.5. Rovnoběžníkem, ve kterém je vepsáno „X – CLOSE“, je myšleno tlačítko pro zavření okna aplikace.



Obr. 6.5: Popis fungování programu



Obr. 6.6: Vývojový diagram popisující události grafického rozhraní (GUI) z obrázku (6.5)

7. Parametry pro monitorování přímého odporového ohřevu

V laboratorním měření, jež se provádí v předmětu Energetické problémy elektrotepelných zařízení na modelu přímého odporového ohřevu, se bude pomocí mého inovativního programu vypracovávat laboratorní protokol. Jak už bylo zmíněno v předešlé kapitole, studenti dostanou pouze krátkou verzi výsledků, u kterých jsou vypsány efektivní hodnoty proudu, napětí a teploty získané každou sekundu. Samotné měření a odevzdání kratší verze naměřených hodnot nestačí k úspěšnému splnění laboratorního měření. Studenti, kteří chtějí toto měření úspěšně dokončit, musí zbylé parametry dopočítat a následně je doplnit grafickými průběhy, pomocí kterých si studenti lépe uvědomí danou problematiku.

Jako vsázka byla použita železná tyč o délce $l = 50$ cm, průměru $d = 8$ mm, měrná hmotnost železa je $\rho = 7800$ kg/m³ a měrná tepelná kapacita $c = 450$ J/kgK. Nový program dopočítá povrch, který je $S = 0,013$ m² a hmotnost vsázky $m = 0,196$ kg. Teplota při spuštění testovacího měření byla 19 °C. Měření se ukončuje v okamžiku, kdy energie dodávaná do vsázky se rovná tepelným ztrátám (teplota již dále neroste).

Mezi monitorovací parametry pro průběh přímého odporového ohřevu patří teplota, efektivní proud a napětí, příkon, odpor, teplo, užitečné teplo, ztrátový výkon, alfa, měrná spotřeba a spotřeba. Jelikož jsem program testoval při měření železné tyče a tyto výsledky prezentoval v předešlé kapitole u obrázku 6.4, z těchto naměřených hodnot vezmu efektivní hodnotu proudu a napětí, čas a teplotu. Jednotlivými výpočty ověřím správnost výsledků a následně použiji program Excel od společnosti Microsoft pro grafické znázornění průběhu tohoto měření podle zadání protokolu.

Efektivní hodnoty proudu a napětí:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j \in N} (u_j)^2} = 0,343 \quad [\text{V}] \quad (7.1)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j \in N} (i_j)^2} = 101,666 \quad [\text{A}] \quad (7.2)$$

Výpočet $\cos\varphi$:

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (T_i - T_u) = 2 \cdot \pi \cdot 50,0 \cdot 0 = 0$$

kde:

T_i – čas průchodu proudu maximem,

T_u – čas průchodu napětí maximem.

Výpočet příkonu:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 0,343 \cdot 101,66 \cdot 1 = 34,90 \quad [\text{VA}] \quad (7.3)$$

Výpočet odporu:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,343}{101,666} = 0,003 \quad [\Omega] \quad (7.4)$$

Výpočet tepla:

$$Q = P \cdot t = 34,90 \cdot 1 = 34,90 \quad [\text{J}] \quad (7.5)$$

Výpočet užitečného tepla:

Vyjadřuje teplo potřebné k ohřevu materiálu získané v minulém vzorku a teplotu v aktuálním vzorku. Abychom byli schopni vypočítat užitečné teplo, je potřeba také znát hmotnost ohřívaného materiálu a měrnou tepelnou kapacitu, v našem případě železa:

$$Q_u = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = 0,196 \cdot 450 \cdot (19,48 - 19,43) = 4,41 \quad [\text{J}] \quad (7.6)$$

Výpočet ztrátového tepla:

Vyjadřuje rozdíl tepla, které při měření vzniklo, a které bylo skutečně použito k ohřevu materiálu.

$$Q_z = Q - Q_u = 34,90 - 4,41 = 30,49 \quad [\text{J}] \quad (7.7)$$

Výpočet ztrátového výkonu:

Ztrátový výkon v daném okamžiku.

$$P_z = \frac{Q_z}{\Delta t} = \frac{30,49}{1,0} = 30,49 \quad [\text{W}] \quad (7.8)$$

kde:

Δt – perioda měření

Výpočet součinitele přestupu tepla:

Vyjadřuje ztrátový výkon, který je odevzdán sáláním na jednotku plochy a Kelvin.

$$\alpha = \frac{P_z}{S \cdot (\vartheta_p - \vartheta_o)} = \frac{30,49}{0,0126 \cdot (19,48 - 19)} = 5642,75 \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (7.9)$$

Výpočet spotřeby:

Celková dodaná energie, která byla potřebná k ohřátí ve Watthodinách.

$$E = \frac{Q_{celková}}{3600} = \frac{30,49}{3600} = 0,010 \quad [\text{Wh}] \quad (7.10)$$

Výpočet měrné spotřeby:

Vzorec vyjadřuje výpočet energii potřebnou k ohřevu 1 kg materiálu.

$$a = \frac{E}{m} = \frac{0,010}{0,1960} = 0,05 \quad [\text{Wh/kg}] \quad (7.11)$$

Grafické zobrazení průběhu měření

V laboratorní úloze se po studentovi žádá, aby vynesl následující grafické průběhy:

1. Změřte a graficky znázorněte oteplovací křivku tyče při přímém odporovém ohřevu
 $\vartheta = f(t)$

Graf 1. Závislost teploty na čase



Z grafu číslo 1 Závislost teploty na čase vidíme, že teplota do času $t = 300$ s roste rychle a dále se zvyšuje pozvolně, než dosáhne maxima, které nastalo okolo času $t = 475$ s. Vzniklé anomálie, které se na křivce objevují od 400 °C až do konce měření, mohli vzniknout vlivem sálání, a to hlavně v bodě, kde je tyč uchycena, případně mohly vzniknout chybou měření karet vlivem šumu.

2. Určete a graficky vynesete průběh tepelných ztrát $P_z = f(t)$

Graf 2. Závislost ztrátového výkonu na čase



Z grafu číslo 2 Závislost ztrátového výkonu na čase je patrné, že ztrátový výkon roste v čase (podle grafu 1 s teplotou).

3. Určete a graficky vynesete průběh závislosti součinitele přestupu tepla na teplotě $\alpha = f(\vartheta)$

Graf 3. Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě



Z grafu číslo 3 Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě nejprve exponenciálně klesá z hodnoty 36 940 a následně se pozvolně ustaluje na hodnotě 70. Pro lepší zobrazení průběhu měření ohřívané tyče jsem osu Y volil v logaritmickém měřítku.

4. Určete a graficky vynesete závislost odporu tyče na teplotě

Graf 4. Závislost odporu tyče na teplotě



Z grafu číslo 4 Závislost odporu tyče na teplotě může vidět, že s rostoucí teplotou roste i odpor tyče. Při zvyšující se teplotě roste i vnitřní energie tělesa, atomy získávají větší rozkmit a to způsobí více srážek s volnými elektrony. To znesnadňuje uspořádaný pohyb elektronů vodičem, což má za následek zvýšení odporu vodiče při zvyšující se teplotě.

8. Závěr

Úkolem mé diplomové práce bylo inovovat stávající SW u laboratorního modelu přímého odporového ohřevu. V teoretické části ve druhé a třetí kapitole jsem nastínil problematiku vedení tepla a přímého odporového ohřevu. Ve čtvrté kapitole jsem zhodnotil stávající software a v páté kapitole jsem popsal inovace monitorovacího software pro přímý odporový ohřev využívaný pro laboratorní měření v předmětu Energetické problémy elektrotepelných zařízení.

Analýzou původního softwaru jsem odhalil nedostatky v přístupu k hardwarovým měřicím kartám, v nastavené periodě měření a ve výpočtech některých veličin.

Motivací pro inovaci software byla nejenom oprava nalezených nedostatků, ale i zastaralost původního softwaru napsaného v jazyce Visual Basic.

Určil jsem parametry pro monitorování průběhu přímého odporového ohřevu a následně jsem začal inovovat program. Inovovaný program jsem napsal v jazyce C# ve vývojovém prostředí Visual Studio. Upravil jsem výpočet efektivní hodnoty napětí a proudu (korekce offsetu nuly pomocí střední hodnoty), přidal výpočet $\cos\varphi$ z okamžitých hodnot napětí a proudu, výpočet dodaného tepla a spotřeby energie a usnadnil jsem zadávání parametrů ohřívaného materiálu. Program je nyní rozdělen do tří hlavních vrstev. Díky tomu je program připraven pro ovládání z příkazového řádku místo použití grafického rozhraní, případně může sloužit jako knihovna volaná z jiných programů. Vytvořil jsem hlavičkové soubory pro použití hardwarových karet v jazyce C#. Přidal jsem do programu virtuální měřicí karty (generující náhodná data), které umožňují spuštění aplikace i na počítači bez hardwarových karet a tím ladění, vývoj a virtuální měření na počítači mimo laboratoř. Inovovaný software jsem vyzkoušel v laboratoři na modelu přímého odporového ohřevu a naměřená data jsem uvedl v grafické podobě.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HRADÍLEK, Z.; LAZNIČKOVÁ, I.; KRÁL, V.: *Elektrotepelná technika*, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011.
- [2] RADA, J. a kol: *Elektrotepelná technika*. Praha SNTL/ALFA, 1985.
- [3] HRADÍLEK, Z.: a kol.: *Elektrotepelná technika, Simulace – počítačové programy*. Ostrava: VŠB, 2001. ISBN 80-7078-874-7.
- [4] Suška, M.: *Optimalizace přímého odporového ohřevu*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.
- [5] Manuál ke kartě MU1221 [online]. [citováno 2021-3-15].
Dostupné z WWW: <https://www.tedia.cz/download/files/mu1221.pdf>
- [6] Manuál ke kartě PCI1052 [online]. [citováno 2021-3-15].
Dostupné z WWW: <http://www.tedia.cz/download/files/pci1052.pdf>
- [7] Manuál ke kartě PCA7228a [online]. [citováno 2021-3-15].
Dostupné z WWW: <https://www.tedia.cz/download/files/pca7000ae.pdf>
- [8] MLČÁK, T; Václav V. *Transformátory* [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2021-3-30].
Dostupné z WWW:
http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMML/Prednasky/9_trafa_sylab_bc_06.pdf
- [9] Visual Basic – Wikipedie. [online].
Dostupné z WWW: https://cs.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic
- [10] TRACH, J. *Visual Basic 6.0* [online]. 1997 [cit. 2021-4-1]. Dostupné z WWW:
<http://boss.ped.muni.cz/vyuka/material/puvodni/Vb5.htm>
- [11] MORKES, D. *Učebnice Visual Basicu 6.0*. Praha: Computer Press, 2000. Učebnice pro střední školy (Computer Press). ISBN 80-7226-312-9.
- [12] C Sharp – Wikipedie. [online.] [citováno 2021-4-5]. Dostupné z WWW:
https://cs.wikipedia.org/wiki/C_Sharp#V%C3%BDvojov%C3%A1_prost%C5%99ed%C3%AD
- [13] Microsoft Visual Studio – Wikipedie. [online]. [citováno 2021-4-5].
Dostupné z WWW: https://cs.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio

